Pokok-pokok Teknologi Struktur untuk Konstruksi dan Arsitektur

Burl E. Dishongh

TAKAAN
A TIMUR

690
015
P
Bangunan
(92784)

POKOK-POKOK TEKNOLOGI STRUKTUR UNTUK

KONSTRUKSI & ARSITEKTUR

Burl E. Dishongh, Ph.D., P.E.
Department of Construction Management
Louisiana State University

J

POKOK-POKOK TEKNOLOGI STRUKTUR UNTUK

KONSTRUKSI & ARSITEKTUR

Burl E. Dishongh, Ph.D., P.E.
Department of Construction Management
Louisiana State University

PENERBIT ERLANGGA
Jl. H. Baping Raya No. 100
Ciracas, Jakarta 13740
e-mail: mahameru@rad.net.id
(Anggota IKAPI)

Dishongh, Burl E.

Pokok-pokok teknologi struktur untuk konstruksi & arsitektur / Burl E. Dishongh ; alih bahasa, Pariatmono ; editor, H.M. Wibi Hardani. -- Jakarta : Erlangga, 2003.
. . . hlm. ; . . . cm.

ISBN 979–741–005–6

1. Bangunan arsitektur. I. Judul. II. Pariatmono. III. Hardani, H.M. Wibi.

624

297.664/BPP/P 106
PERPUSTAKAAN
BADAN PERPUSTAKAAN
PROPINSI JAWA TIMUR

Pokok-pokok Teknologi Struktur untuk Konstruksi dan Arsitektur
Burl E. Dishongh

Judul Asli:
Essential Structural Technology for Construction and Architecture
Burl E. Dishongh

Buku ini terbit berkat kerja sama antara ***Penerbit Erlangga*** dengan Pusat Perbukuan Depdiknas

Authorized translation from the English language edition, entitled ESSENTIAL STRUCTURAL TECHNOLOGY FOR CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE, 1st Edition, ISBN: 0130128589 by DISHONGH, BURL E., published by PEARSON EDUCATION, INC, publishing at Prentice Hall, Copyright © 2001.

All right reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage system, without permission from Pearson Education Inc.
Bahasa Indonesia language edition published by PENERBIT ERLANGGA, Copyright © 2004.

Hak terjemahan dalam Bahasa Indonesia pada ***Penerbit Erlangga***,
berdasarkan perjanjian pada tanggal 25 Maret 2003

Alih Bahasa : **Dr. Ir. Pariatmono**
Teknik Sipil, Universitas Mercu Buana, Jakarta

Editor : H.M. Wibi Hardani, S.T.

Buku ini diset dan dilayout oleh Bagian Produksi ***Penerbit Erlangga*** dengan Power Macintosh G4 (AGaramond 11)

Setting oleh : Tim Perti MIPA

Dicetak : **PT. Gelora Aksara Pratama**

08 07 06 05 04 8 7 6 5 4 3 2 1

Dilarang keras mengutip menjiplak, memfotokopi atau memperbanyak dalam bentuk apa pun, baik sebagian atau keseluruhan isi buku ini, serta memperjualbelikannya tanpa izin tertulis dari ***Penerbit Erlangga.***

© HAK CIPTA DILINDUNGI OLEH UNDANG-UNDANG

PRAKATA

Studi mengenai teknologi struktur adalah salah satu komponen utama dalam pelatihan profesional untuk insinyur, arsitek, kontraktor bangunan, manajer proyek konstruksi, pengawas, dan pihak-pihak lain yang terlibat dalam konstruksi bangunan, jembatan, dan bentuk struktur lainnya. Fokus dari teknologi struktur adalah penggunaan material bangunan secara efisien—terutama beton, baja, dan kayu—untuk menahan semua beban pada struktur dengan aman. Sebagian besar profesional yang terlibat dengan konstruksi memang bukan insinyur sipil, namun demikian pihak-pihak tersebut perlu memahami dasar-dasar teknologi struktur yang merupakan perhatian utama dari insinyur sipil, termasuk beban struktur, cara beban tersebut ditumpu oleh struktur di tanah, dan cara menyampaikan informasi ini kepada profesional lainnya.

Pokok-pokok Teknologi Struktur untuk Konstruksi dan Arsitektur ditujukan untuk mahasiswa dan praktisi profesional yang ingin memahami pengertian dasar dari analisis dan desain struktur. Buku ini menyajikan pembahasan ringkas mengenai teknologi struktur, mulai dari penentuan beban struktur sampai penentuan ukuran pondasi. Buku ini dapat berfungsi sebagai acuan atau referensi untuk praktisi profesional di bidang konstruksi yang ingin memahami permasalahan struktur.

Dalam buku *Pokok-pokok Teknologi Struktur untuk Konstruksi dan Arsitektur* ini, kita memusatkan perhatian pada konsep-konsep penting seperti statika, mekanika material, analisis struktur, desain kayu, desain baja, desain beton bertulang, mekanika tanah, dan desain pondasi. Pembaca akan menemukan bahwa dasar-dasar analisis dan desain struktur adalah penerapan-penerapan yang logis dari hukum alam dengan bentuk matematika yang mudah dipahami. Pembaca akan mendapatkan pengetahuan yang cukup mengenai struktur agar dapat memprediksi cara struktur menahan beban, serta bekerja sama dengan profesional di bidang konstruksi lainnya untuk menganalisis, mendesain, dan membangun struktur.

Kita akan memulai dengan pembahasan mengenai gaya-gaya alami yang bekerja pada struktur. Kita akan melihat cara beban ditahan oleh setiap komponen struktur. Beban-beban tersebut menghasilkan gaya-gaya yang proporsional di setiap komponen yang menghasilkan tarik, tekan, tegang, puntir, lentur, dan/atau tekuk. Kita juga akan melihat hubungan-

hubungan antara intensitas gaya pada komponen dan pengaruh deformasi untuk menentukan proporsi dan material yang tepat untuk elemen struktur. Seperti benda-benda lain di alam, beban struktur dipengaruhi oleh gaya tarik ke bawah oleh bumi, dan kita akan mempelajari sifat-sifat dan perilaku tanah dalam kaitannya dengan struktur.

Tujuan dari *Pokok-pokok Teknologi Struktur untuk Konstruksi dan Arsitektur* adalah menyajikan pembahasan ringkas mengenai seluruh topik mendasar dari bidang teknologi struktur agar dapat dipahami oleh banyak pembaca. Buku ini bukanlah buku panduan untuk insinyur struktur; buku ini merupakan bentuk yang lebih bebas dari buku-buku sejenis mengenai struktur. Prinsip-prinsip sederhana dibahas untuk mendapatkan hubungan-hubungan antara beban struktur dan pengaruh-pengaruhnya. Bab-bab di dalam buku ini digunakan untuk membahas tiap-tiap kelompok prinsip-prinsip struktur yang terkait dan menerapkan prinsip-prinsip tersebut dalam masalah-masalah struktur tipikal.

Banyak buku teknik dilengkapi dengan latihan soal untuk tiap topik yang disajikan, tetapi buku-buku tersebut biasanya ditujukan khusus untuk membahas secara intensif teori-teori terperinci dalam suatu bidang tertentu, seperti kekuatan material, desain baja, atau mekanika tanah. Sebaliknya, *Pokok-pokok Teknologi Struktur untuk Konstruksi dan Arsitektur* menyajikan suatu tinjauan bagi pembaca mengenai seluruh bidang teknologi struktur, dengan contoh-contoh penggunaannya untuk memperjelas prinsip-prinsip yang dibahas. Dengan demikian, penulis beranggapan bahwa pembaca telah mengalami repetisi materi yang cukup memadai setelah membaca keseluruhan buku ini, terutama apabila pembaca meluangkan waktu mengerjakan latihan soal yang menyertai banyak contoh aplikasi.

DAFTAR ISI

1 GAYA DAN STRUKTUR

1.1 BEBAN STRUKTURAL DASAR 1
1.2 KESETIMBANGAN GAYA DAN MOMEN 2
1.3 KOMPONEN-KOMPONEN GAYA 6
1.4 TUMPUAN RAMBU 9
1.5 GESEKAN PADA DAERAH MIRING 11
1.6 PANEL DINDING-MIRING 14
1.7 PUSAT GAYA BERAT DARI SEBUAH TRUK DI ATAS SEBUAH JEMBATAN 16
1.8 BEBAN-BEBAN GRAVITASI MERATA 17
1.9 BEBAN LATERAL MERATA 20
1.10 DINDING PENAHAN 22

2 KOMPONEN-KOMPONEN STRUKTUR

2.1 BAGIAN-BAGIAN STRUKTUR 25
2.2 BALOK 27
2.3 REAKSI-REAKSI INTERNAL DENGAN METODE POTONGAN 31
2.4 BALOK UTAMA DEREK DI ATAS KEPALA 34
2.5 BALOK DEK YANG TERGANTUNG 36
2.6 KABEL 40
2.7 JEMBATAN GANTUNG TALI 43
2.8 LENGKUNGAN 45
2.9 KOLOM 48
2.10 SAMBUNGAN-SAMBUNGAN 48

3 SUSUNAN-SUSUNAN STRUKTUR

3.1 BEBAN-BEBAN RENCANA 52
3.2 DAERAH PEMBEBANAN DAN JALUR BEBAN 58
3.3 JALUR BEBAN PADA SEBUAH BANGUNAN BERTINGKAT-BANYAK 60
3.4 SISTEM STRUKTUR 62
3.5 RANGKA BATANG (TRUSS) 64
3.6 RANGKA BATANG ATAP (ROOF-TRUSS) 69
3.7 PENENTUAN TARAF BEBAN DARI SEBUAH JEMBATAN RANGKA

Batang Dek (deck truss bridge) 72
3.8 Rangka 75
3.9 Lengkungan Radial Tiga-sendi 80
3.10 Struktur Diafragma 82
3.11 Dinding Geser Interior 84

4 Tegangan dan Deformasi pada Struktur

4.1 Tegangan, Regangan, dan Deformasi 86
4.2 Menentukan Modulus Elastisitas Kayu 91
4.3 Lantai Pascatarik 93
4.4 Tegangan dan Deformasi akibat Perubahan Suhu 95
4.5 Tekuk pada Perkerasan Jalan Raya akibat Panas 96
4.6 Bagian-bagian Struktur Komposit 98
4.7 Titik berat-titik berat dan Tegangan Aksial Nonuniform 100
4.8 Tegangan Dukung 104

5 Tegangan Geser

5.1 Tegangan Geser Sederhana 106
5.2 Tegangan Dukung dan Geser pada Sebuah Korbel 108
5.3 Geser Jeblos Melalui Pengkakian 109
5.4 Tegangan Geser Puntir 112
5.5 Pemusatan Tegangan dan Baut-baut 113
5.6 Pengelasan 116
5.7 Sambungan Baut dan Sambungan Las 117

6 Tegangan dan Deformasi pada Balok

6.1 Tegangan Lentur 120
6.2 Tegangan Geser Lentur 123
6.3 Lendutan-lendutan Balok 126
6.4 Lentur, Geser, dan Lendutan pada Sebuah Balok Kayu 132
6.5 Lendutan dan Tegangan Balok Utama Pelat Baja 134
6.6 Balok Beton Bertulang 137
6.7 Balok Kantilever yang Disandarkan 139

7 Tegangan Gabungan, Kolom, dan Balok-Kolom 142

7.1 Gabungan Tegangan Lentur dan Aksial 142
7.2 Kord Rangka Batang yang Dibebani Transversal 145

7.3 Distribusi Tegangan Merata di Bawah Pondasi Tapak 146
7.4 Tekuk pada Kolom-kolom Lurus Ramping 148
7.5 Penambahan Beban Tekuk pada Sebuah Kolom Berongga 152
7.6 Kolom yang Dibebani Eksentris dan Kurva-kurva Kolom 155
7.7 Grafik-grafik Desain Kolom 160
7.8 Persamaan Interaksi Balok-Kolom 162

8 Besaran-besaran Tanah yang Mendasar
8.1 Tinjauan Umum 164
8.2 Pembentukan Tanah 165
8.3 Eksplorasi Tanah dan Pengambilan Sampel Tanah 166
8.4 Klasifikasi Tanah 168
8.5 Hubungan Volume-Kepadatan 170
8.6 Pemadatan Tanah 174
8.7 Pemadatan Tanah untuk Lahan Pemukiman 177
8.8 Kekuatan Tanah 179
8.9 Penurunan dan Konsolidasi Pondasi 182
8.10 Perbedaan Penurunan 186

9 Struktur dalam Tanah
9.1 Pondasi Dangkal dan Pondasi Dalam 189
9.2 Pondasi Tapak Penyebar Beban (Spread Footing) 190
9.3 Desain Pondasi Tapak Lajur 194
9.4 Tiang Pancang dan Pilar Bor 196
9.5 Analisis Tumpuan Jembatan di atas Tiang Pancang 200
9.6 Stabilitas Kemiringan Permukaan Tanah 203
9.7 Dinding Ruang Bawah Tanah (Basement) 207

10 Penerapan pada Desain Struktur Kayu
10.1 Tegangan yang Diijinkan untuk Kayu, Baja dan Beton 211
10.2 Balok Anak (joist), Usuk (rafter), dan Stud 213
10.3 Tabel Balok Anak 218
10.4 Balok Induk Lantai 220
10.5 Balok Bubungan/Nok Glulam 222
10.6 Balok Induk Lantai dengan Pengkaku 225
10.7 Kolom 228

10.8 Baut dan Paku 228
10.9 Busur Tudor Glulam 232

11 Penerapan pada Desain Struktur Baja

11.1 Bentuk Struktur 237
11.2 Balok Anak Rangka Batang Terbuka dan Dek Lantai Balok Rol 241
11.3 Kolom 247
11.4 Balok- Kolom 250
11.5 Ikatan Angin 254
11.6 Jembatan Balok Utama Plat 256

12 Penerapan pada Desain Struktur Beton

12.1 Analisis Lentur Pada Balok 262
12.2 Penulangan Geser 267
12.3 Portal Menerus 269
12.4 Sistem Plat (slab) dan Lantai 274
12.5 Beban Gempa pada Portal Kaku 277
12.6 Balok-Kolom 279
12.7 Balok Utama Pascatarik dan Prategang 284

Index

1 GAYA DAN STRUKTUR

1.1 BEBAN STRUKTURAL DASAR

Sebuah struktur harus mampu menahan semua beban yang diberikan pada struktur tersebut secara efisien dan aman. Beban struktural merupakan hasil dari gaya-gaya natural. Bahan-bahan yang umum digunakan dalam konstruksi—beton, baja, dan kayu—dibuat menjadi elemen-elemen struktural seperti balok, kolom, lengkungan, dan rangka batang. Elemen-elemen struktural tersebut harus disusun menjadi bentuk-bentuk struktural terbaik yang dapat berfungsi sebagai suatu struktur, namun tetap aman menahan semua beban.

Beban-beban struktural yang paling mendasar adalah beban gravitasi yang bekerja dalam arah vertikal pada struktur. Beban ini mencakup beban mati dan beban hidup yang disebabkan oleh tarikan gravitasi bumi. *Beban mati* adalah berat struktur itu sendiri—seperti berat atap, dinding, lantai, balok, kolom, dan lain sebagainya. *Beban hidup* adalah beban-beban seperti manusia, perabot yang dapat dipindah-pindahkan, mesin pengangkat barang (*forklift*), mobil, truk, salju, perubahan suhu, atau beban-beban lain yang dapat membebani struktur dalam jangka waktu tertentu.

Beban lateral angin dan gempa bumi adalah beban hidup yang bekerja secara mendatar pada struktur. Ketika angin berhembus ke suatu struktur, struktur tersebut akan bergoyang ke arah samping. Ketika terjadi peristiwa gempa bumi, tanah tempat sebuah struktur yang masif didirikan dengan cepat bergoyang ke arah samping. Gaya gempa bumi yang besar bekerja pada struktur ketika massa struktur tersebut menahan gaya lateral yang mendadak. Elemen-elemen struktural yang menahan tanah, seperti dinding penahan (*retaining wall*) dan lantai bawah tanah (*basement*), juga mengalami pembebanan lateral dari tanah, karena tanah tersebut melawan adanya suatu pengekangan dari elemen-elemen struktural seperti itu.

Dalam keseluruhan buku ini, kita akan membahas beban-beban aktif dan reaktif pada elemen-elemen struktural seperti balok, kabel, lengkungan. rangka batang, rangka, dan dinding geser. Dengan pengecualian terhadap beban mati, yang merupakan beban dari struktur itu sendiri, adalah sangat

sulit mengetahui secara tepat besarnya gaya-gaya natural yang bekerja pada suatu struktur karena banyaknya variasi dan ketidakpastian. Karena itu, kita akan meninjau beban-beban nominal yang dengan akurat menunjukkan aksi-aksi dari berbagai macam beban lateral dan berbagai macam beban hidup akibat gravitasi bumi yang paling mungkin membebani sebuah struktur. Kata *mungkin* pada kalimat di atas perlu diperhatikan, karena data mengenai beban seringkali diambil dari survei-survei terhadap ratusan bentuk struktur, dan analisis statistik dilakukan untuk membuktikan kebenaran bahwa beban-beban nominal pada desain benar-benar merupakan indikator yang akurat dari beban-beban aktual yang ada.

1.2 Kesetimbangan Gaya dan Momen

Kita dapat memulai pembahasan mengenai kesetimbangan struktural dengan meninjau gaya-gaya. Sebuah *gaya* adalah sebuah dorongan atau sebuah tarikan yang bekerja pada sebuah benda. Ketika Anda sedang berdiri di atas tanah, berat Anda adalah sebuah gaya (aksi) aktif yang menekan ke bawah menuju bumi. Apabila Anda benar-benar ingin mengalami gaya ini, mintalah seseorang untuk berdiri di atas Anda! Anda dapat berdiri dengan tegak karena tanah menekan Anda dengan sebuah gaya reaktif (reaksi) yang berlawanan, yang besarnya sama dengan berat Anda. Perhatikan bahwa istilah-istilah—gaya, beban, aksi, dan reaksi—semuanya mengacu pada dorongan atau tarikan dari suatu benda terhadap benda lainnya. Seperti halnya berat Anda, gaya dinyatakan dalam satuan pounds (lb). Kesetimbangan terjadi ketika aksi-aksi dilawan oleh reaksi-reaksi yang sama besar.

Ketika beban bekerja pada bagian-bagian struktur, kita perlu menentukan gaya-gaya reaksi apa saja yang ada untuk menahan gaya-gaya aktif agar berada dalam kesetimbangan. Pada sebuah struktur dengan banyak bagian struktur, gaya reaksi dari sebuah bagian struktur menjadi beban aksi pada bagian struktur yang menahannya. Dan, kita perlu mengetahui semua gaya yang bekerja pada suatu bagian struktur, apabila kita ingin membatasi besarnya gaya-gaya dalam (tegangan-tegangan) dan deformasi-deformasi yang terkait. Pada akhirnya, sebuah struktur harus dengan aman menyalurkan semua beban bagian struktur ke pondasi dan ke dalam tanah.

Kita biasanya menggambarkan dorongan atau tarikan dari sebuah gaya dengan tanda anak panah dalam arah dorongan atau tarikan tersebut. Gambar 1.1 menggambarkan seseorang dengan berat badan 150 *pound* (lb) berdiri di atas sebuah balok yang ditumpu dua buah blok di kedua ujungnya. Panjang anak panah di sini digambarkan sebanding dengan

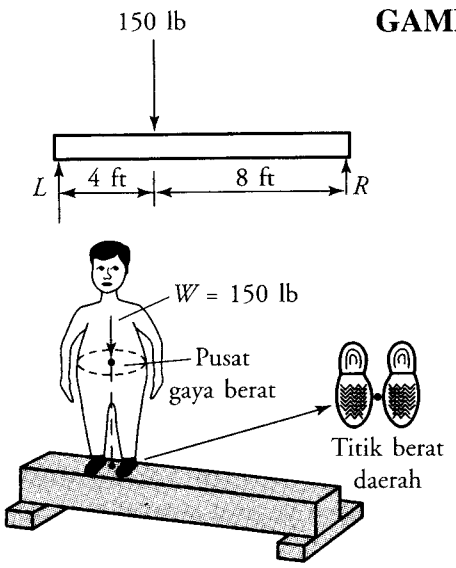
besar gaya yang bekerja pada balok. Kedua gaya reaksi ke atas pada tumpuan balok harus melawan gaya ke bawah dari berat orang tersebut. Berat balok diabaikan untuk pembahasan kasus ini.

Gaya-gaya terpusat bekerja pada sebuah titik, tetapi pada kenyataannya, tidak ada satu gaya pun yang dapat bekerja di sebuah titik, yang artinya tidak memiliki daerah kerja. Sebenarnya, beban harus bekerja di sebuah daerah terbatas, yang lebih memudahkan dianggap sebagai sebuah titik apabila kita meninjau kesetimbangan gaya. Orang yang berdiri di atas balok pada Gambar 1.1 menghasilkan gaya terpusat sebesar 150 lb pada satu titik di atas balok di antara kedua kakinya. Namun demikian, kita melihat bahwa sebenarnya gaya sebesar 150 lb tersebut disebarkan pada daerah seluas telapak kaki orang tersebut pada balok. Gaya berat dari orang yang berdiri tegak sebenarnya bekerja pada satu titik yang dikenal sebagai pusat gaya berat dari sebuah garis kerja gaya yang melalui pusat daerah telapak kaki yang disebut titik berat daerah. Kita akan membahas lebih lanjut mengenai pusat gaya berat dan titik berat daerah pada bagian berikutnya dalam buku ini.

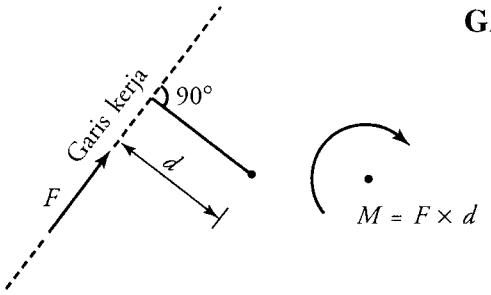
Jika orang tersebut berdiri di tengah balok, tiap-tiap reaksi dengan mudah terlihat sama dengan $\frac{1}{2} \times 150 = 75$ lb. Namun, ketika orang tersebut berdiri mendekati salah satu ujung balok, seperti yang terlihat pada gambar, reaksi pada tumpuan yang lebih dekat akan lebih besar daripada reaksi pada tumpuan yang lebih jauh. Tetapi, bagaimana cara kita menentukan reaksi-reaksi pada kasus ini?

Agar terjadi kesetimbangan pada sebuah benda, jumlah seluruh gaya yang bekerja pada benda itu harus sama dengan nol. Jumlah dari gaya-gaya vertikal dan jumlah dari gaya-gaya horizontal harus sama dengan

GAMBAR 1.1



GAMBAR 1.2



nol, sebab jika tidak, benda tersebut akan bergeser dalam arah gaya yang tak setimbang. Kedua keadaan gaya tersebut penting untuk menjamin adanya kesetimbangan, tetapi ada kondisi lain yang juga diperlukan.

Mengacu pada Gambar 1.2, garis kerja sebuah gaya adalah garis yang terbentuk dengan memperpanjang anak panah dalam kedua arah. Sebuah gaya mempunyai daya ungkit (*leverage*) terhadap suatu titik manapun yang berada di luar garis kerjanya. Kita menyebut daya ungkit dari gaya terhadap suatu titik sebagai momen dari gaya, atau cukup disebut momen.

Momen adalah kecenderungan dari sebuah gaya untuk berputar terhadap suatu titik. Besar dari momen adalah gaya dikalikan dengan jarak terdekat antara titik itu dengan garis gaya. Jarak terdekat ini disebut lengan tuas (*lever arm*) atau lengan momen, dan tegak lurus terhadap garis kerja gaya, seperti yang terlihat pada gambar. Satuan momen adalah *foot-pounds* (ft-lb).

Apabila sebuah benda berada dalam kesetimbangan, maka benda tersebut tidak bergerak terhadap titik acuan manapun. Pilihlah suatu titik, dan momen-momen dari semua gaya yang bekerja pada sebuah benda harus saling melawan satu dengan yang lainnya, sehingga kecenderungan keseluruhan benda untuk mengalami perputaran adalah nol. Keadaan ini harus merupakan sebuah kebenaran dari titik manapun yang Anda pilih, sebab jika tidak, benda akan berputar terhadap titik tersebut. Jadi, selain kedua kondisi kesetimbangan gaya, kita memerlukan kondisi ketiga, yaitu kesetimbangan momen—jumlah dari semua momen terhadap sebuah titik manapun harus sama dengan nol.

Ketiga kondisi kesetimbangan itu menghasilkan tiga persamaan kesetimbangan. Pada Gambar 1.1, tidak ada gaya horizontal yang bekerja pada balok, sehingga sebuah persamaan sederhana akan menyatakan bahwa jumlah dari semua gaya horizontal (nol) sama dengan nol. Apabila berat ke arah bawah adalah 150 lb, maka gaya reaktif kiri dan gaya reaktif kanan, yaitu L dan R, secara bersama-sama harus melawan beban vertikal dengan gaya total neto sebesar 150 lb, dan kita dapat menulis persamaan kesetimbangan gaya vertikal menjadi

$$L + R - 150 = 0$$

Kita biasanya mengambil arah ke atas dan arah ke kanan sebagai positif. Persamaan tersebut menyatakan bahwa semua gaya vertikal menghasilkan jumlah yang sama dengan nol.

Balok tersebut panjangnya 12 ft, dan orang tersebut berdiri dengan jarak 4 ft dari ujung kiri. Pilihlah titik sembarang manapun, seperti di titik orang tersebut berdiri di atas balok. Lengan tuas di sekitar titik ini berjarak 4 ft dari reaksi kiri, L, dan 8 ft dari reaksi kanan R. Kita dapat menulis persamaan kesetimbangan momen menjadi,

$$4 \times L - 8 \times R = 0$$

Putaran rotasi momen searah jarum jam biasanya dianggap positif. Dengan menyusun dan mensubstitusikan suku-suku, kita menemukan jawaban dari dua persamaan kesetimbangan terdahulu yaitu $L = 100$ lb, dan $R = 50$ lb, yang juga menjawab pertanyaan kita pada subbab terdahulu.

Karena garis kerja gaya sebesar 150 lb tersebut melalui titik yang kita pilih untuk penjumlahan momen, maka garis tersebut tidak memiliki daya ungkit di sekitar titik ini. Kita dapat menulis sebuah persamaan momen yang berbeda dengan menjumlahkan momen-momen terhadap sebuah titik pada ujung kiri balok. Pada kasus ini, momen searah jarum jam akibat berat orang tersebut adalah $150 \times 4 = 600$ ft-lb dan dilawan oleh momen berlawanan arah jarum jam sebesar $12 \times R$, jadi

$$600 - 12 \times R = 0$$

Lagi-lagi kita menemukan bahwa $R = 50$ lb. Karena gaya L melalui ujung kiri balok, maka gaya tersebut tidak memiliki lengan tuas dan tidak menimbulkan momen terhadap titik tersebut.

Sebagai contoh lain, tinjaulah tangga pada Gambar 1.3. Berat orang secara vertikal sebesar 150 lb dilawan oleh reaksi vertikal dari lantai beton, A, sehingga $A = 150$ lb. Ini sama saja dengan menulis

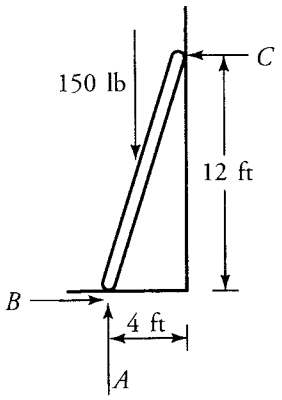
$$A - 150 = 0$$

Gesekan antara lantai beton yang kasar dan dasar tangga memungkinkan sebuah reaksi horizontal, B, untuk menahan reaksi horisontal, C, yang diterapkan oleh dinding tempat ujung atas tangga disandarkan terhadap tangga yang menekan dinding tersebut. Kedua gaya horisontal tersebut harus sama dan saling melawan satu sama lain, sehingga

$$B - C = 0$$

Kita memilih dasar dari tangga sebagai sebuah titik untuk menjumlahkan momen-momen. Hal ini cukup tepat, karena baik gaya A maupun gaya B, memiliki garis-garis kerja yang melalui titik ini, dan tidak menimbulkan momen terhadap titik tersebut. Ingatlah bahwa

GAMBAR 1.3



momen dari sebuah gaya terhadap sebuah titik adalah gaya dikalikan dengan jarak terdekat antara garis kerja gaya dengan titik tersebut. Oleh karena itu, berat orang tersebut menimbulkan sebuah momen searah jarum jam sebesar 2 ft × 150 lb = 300 ft-lb. Kita mendapatkan sebuah momen berlawanan arah jarum jam sebesar 12 × C dari reaksi dinding, sehingga

$$300 - 12 \times C = 0$$

Kita menemukan C = 25 lb. Dan apabila $B - C = 0$, maka kita menemukan bahwa B = 25 lb.

Contoh-contoh terdahulu membahas mengenai bagaimana keadaan kesetimbangan memungkinkan kita menentukan gaya-gaya yang bekerja pada suatu benda. Proses yang sama diterapkan pada bagian-bagian struktur, atau bahkan pada struktur secara keseluruhan, untuk menentukan besar gaya. Pada subbab berikut, kita akan melihat cara-cara untuk menyederhanakan situasi di mana gaya-gaya tidak sepenuhnya berada dalam arah vertikal atau horisontal.

1.3 Komponen-komponen Gaya

Seringkali, sebuah gaya berarah miring terhadap arah horisontal dan vertikal, seperti terlihat pada Gambar 1.4. Untuk dapat menggunakan persamaan-persamaan kesetimbangan, gaya miring tunggal tersebut digantikan dengan proyeksi horisontal dan proyeksi vertikalnya. Kedua proyeksi ini disebut *komponen-komponen gaya*. Kedua komponen gaya itu adalah pengganti yang setara untuk gaya miring tunggal tersebut, dan begitu pula sebaliknya.

Apabila kita mengukur sudut tajam yang terbentuk oleh gaya miring F dengan garis vertikal dan menyebut sudut tersebut z, maka kita dapat menyatakan bahwa,

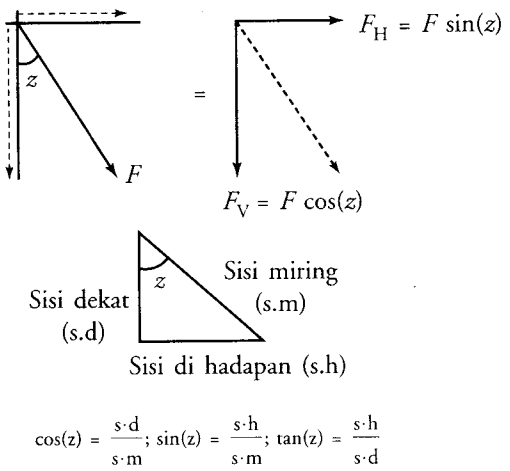
$$F_{\text{HORISONTAL}} = F_{\text{H}} = F \times \sin(z)$$
$$F_{\text{VERTIKAL}} = F_{\text{V}} = F \times \cos(z)$$

Dari ilmu trigonometri, kita ingat bahwa kosinus sebuah sudut tajam dari suatu segitiga siku-siku adalah perbandingan antara sisi yang terdekat dengan sisi miringnya, sedangkan sinus sudut tersebut adalah perbandingan antara sisi di hadapan sudut tersebut dengan sisi miringnya. Perbandingan antara sisi di hadapan dengan sisi yang dekat adalah tangen dari sudut tersebut. Hubungan-hubungan tersebut diperlihatkan pada Gambar 1.4.

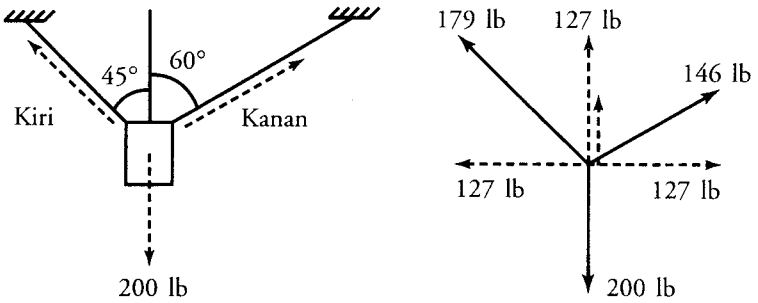
Apabila kita mengganti semua gaya miring dengan dua komponennya sebelum melakukan hal-hal lain, langkah-langkah pengecekan kesetimbangan momen dan gaya dapat secara sistematis diterapkan, seperti pada kasus balok dan tangga yang telah kita bahas sebelumnya. Sebagai contoh, Gambar 1.5 memperlihatkan sebuah beban seberat 200 lb yang ditumpu oleh dua utas tali. Ketiga gaya yang bekerja pada beban, pada dasarnya bertemu pada titik yang sama. Ketika hal ini terjadi, gaya-gaya dikatakan menjadi konkuren, dan gaya-gaya tersebut tidak memiliki daya ungkit pada benda tersebut. Dengan gaya-gaya yang konkuren tersebut, kita hanya perlu meninjau dua kondisi kesetimbangan gaya karena jumlah dari momen-momen adalah nol.

Dari sebuah garis vertikal, tali yang kiri miring dengan sudut sebesar 45°, dan tali yang kanan miring dengan sudut 60°. Beban aktif seberat 200 lb menimbulkan gaya-gaya reaktif pada kedua utas tali seperti yang terlihat pada gambar. Komponen-komponen vertikal dari gaya-gaya tali reaktif terlihat melawan beban vertikal sebesar 200 lb. Komponen-komponen gaya tali horisontal harus saling melawan satu dengan lainnya

GAMBAR 1.4



GAMBAR 1.5



untuk memastikan adanya kesetimbangan gaya horisontal. Kita dapat menulis persamaan kesetimbangan gaya vertikal menjadi,

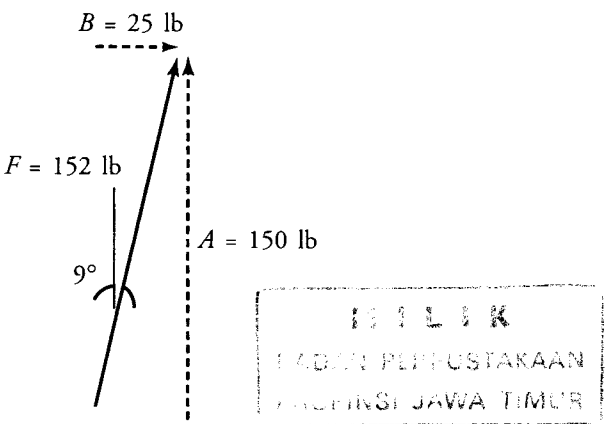
$$L_V + R_V - 200 = 0$$
$$L \times \cos(45°) + R \times \cos(60°) - 200 = 0$$
$$0{,}707(L) + 0{,}5(R) = 200$$

Dengan cara yang sama, kita dapat menulis persamaan kesetimbangan gaya horisontal menjadi,

$$L_H - R_H = 0$$
$$L \times \sin(45°) - R \times \sin(60°) = 0$$
$$0{,}707(L) = 0{,}866(R)$$

Penyelesaian dari kedua persamaan kesetimbangan gaya tersebut adalah $L = 179$ lb dan $R = 146$ lb. Gaya-gaya tali dan nilai-nilai dari komponen-komponennya diperlihatkan pada gambar.

GAMBAR 1.6



MILIK
PERPUSTAKAAN
PROPINSI JAWA TIMUR

Pada kasus di atas, kita mengetahui sudut-sudut miring dari kedua gaya yang miring. Apabila sebuah gaya tidak diketahui besarnya atau sudut miringnya, gaya tersebut dapat diganti dengan komponen-komponen vertikal dan horisontalnya, F_V dan F_H. Apabila kedua komponen tersebut kemudian ditentukan dari sebuah analisis kesetimbangan, kita dapat menentukan gaya, F, dan sudut miring, z, dengan

$$F = \sqrt{(F_V^2 + F_H^2)}$$

$$z = \arctan\left(\frac{F_H}{F_V}\right)$$

Sebagai contoh, kita telah menggunakan konsep ini untuk kasus tangga pada Gambar 1.3. Kita menentukan A dan B sebagai komponen-komponen reaksi pada dasar tangga. Gambar 1.6 memperlihatkan bahwa kedua gaya ini sebenarnya merupakan komponen-komponen dari suatu besaran gaya reaktif yang tak diketahui, F, dan kemiringan gaya, z. Dengan A = 150 lb, dan B = 25 lb, kita menemukan bahwa F = 152 lb, dan $z = 9°$.

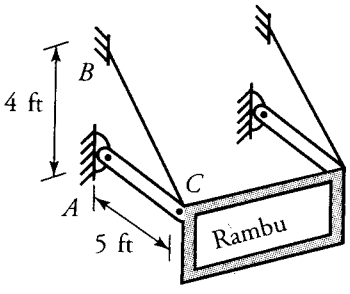
1.4 Tumpuan Rambu

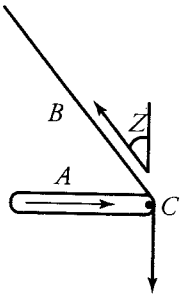
Mari kita lihat bagaimana konsep kesetimbangan gaya dan komponen-komponennya dapat diterapkan pada sebuah struktur yang sangat sederhana, di mana satu-satunya beban aktif diakibatkan oleh berat struktur itu sendiri, atau beban mati. Rambu kayu pada Gambar 1.7 dipasang pada sisi sebuah bangunan, dan ditumpu secara sama oleh dua kabel serta dua tiang. Tiap-tiap susunan tiang dan kabel memikul setengah dari berat rambu yang besarnya 300 lb. Untuk menentukan kecukupan dari bagian-bagian struktural, kita ingin mengetahui gaya pada kabel-kabel, dan gaya tekan pada tiang yang menyambungkan rambu dengan dinding bangunan.

Titik kumpul C dalam susunan ABC dipisahkan, dan sebuah diagram beban digambarkan, seperti yang diperlihatkan pada gambar. Diagram beban ini seringkali disebut diagram benda-bebas (*free-body diagram*), karena benda dipisahkan secara bebas dari keadaan di sekitarnya, dan semua gaya aktif serta semua gaya reaktif, baik yang diketahui maupun yang tak diketahui, diterapkan pada benda untuk menggantikan pengaruh dari keadaan sebelumnya di sekitar benda. Diagram beban juga mencakup dimensi-dimensi apapun dan/atau sudut-sudut apapun yang diperlukan untuk menuliskan persamaan-persamaan kesetimbangan.

Pada kasus ini, gaya tarik pada kabel, B, gaya tekan tiang, A, dan setengah dari berat rambu, 150 lb, bekerja pada titik kumpul C. Dalam

GAMBAR 1.7

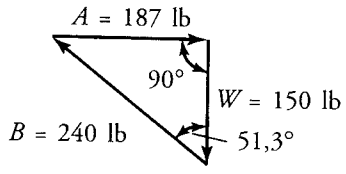




Berat rambu = 300 lb

$W = \frac{300}{2} = 150$ lb

$Z = \arctan \frac{5}{4} = 150$ lb



Segitiga gaya

persoalan mengenai gaya-gaya yang konkuren, semua gaya diasumsikan melalui sebuah titik yang sama, dan gaya-gaya tersebut tidak memiliki lengan momen yang dapat menimbulkan rotasi, sehingga kesetimbangan momen terpenuhi dengan sendirinya. Kedua persamaan kesetimbangan gaya diperlukan untuk menentukan gaya-gayanya dan sudut-sudut miringnya. Gaya A bekerja secara horisontal, dan setengah dari berat rambu sebesar 150 lb bekerja secara vertikal, sedangkan dari geometri persoalan, gaya B bekerja pada sudut z = arctan (5/4) = 51,3° dari sebuah sumbu vertikal. Dari kesetimbangan gaya vertikal, dapat dilihat bahwa

$$B = \frac{150}{\cos(51{,}3°)} = 240 \text{ lb}$$

Dari kesetimbangan gaya horisontal

$$A = 240 \times \sin(51{,}3°) = 187 \text{ lb}$$

Pembentukan segitiga tertutup dengan tiga gaya yang konkuren dalam kesetimbangan seringkali dapat membantu, seperti terlihat pada gambar. Sebuah segitiga gaya seperti ini dapat membantu kita untuk mengamati secara grafis hubungan-hubungan di antara ketiga gaya tersebut, seperti yang akan kita lihat pada situasi-situasi lainnya yang akan datang.

Latihan Kerjakan kembali soal ini dengan menganggap jarak antara A dan B

a. 3 ft.
b. 8 ft. ■

1.5 Gesekan pada Daerah Miring

Sekarang, kita akan melihat sebuah contoh lain dari persoalan kesetimbangan gaya yang konkuren, dan pada saat yang bersamaan kita juga membahas beberapa ide dasar mengenai sifat dari gesekan, yaitu gaya aktif-reaktif yang terjadi dalam saling kontak antara permukaan sebuah benda yang kasar dengan benda lainnya. Secara umum, semakin kasar permukaan benda yang saling bersentuhan, semakin besar gesekan yang timbul antara benda-benda tersebut. Kita akan melihat bahwa beberapa jenis struktur, terutama bagian-bagian struktur pondasi, mengandalkan gesekan agar tetap berada dalam kesetimbangan.

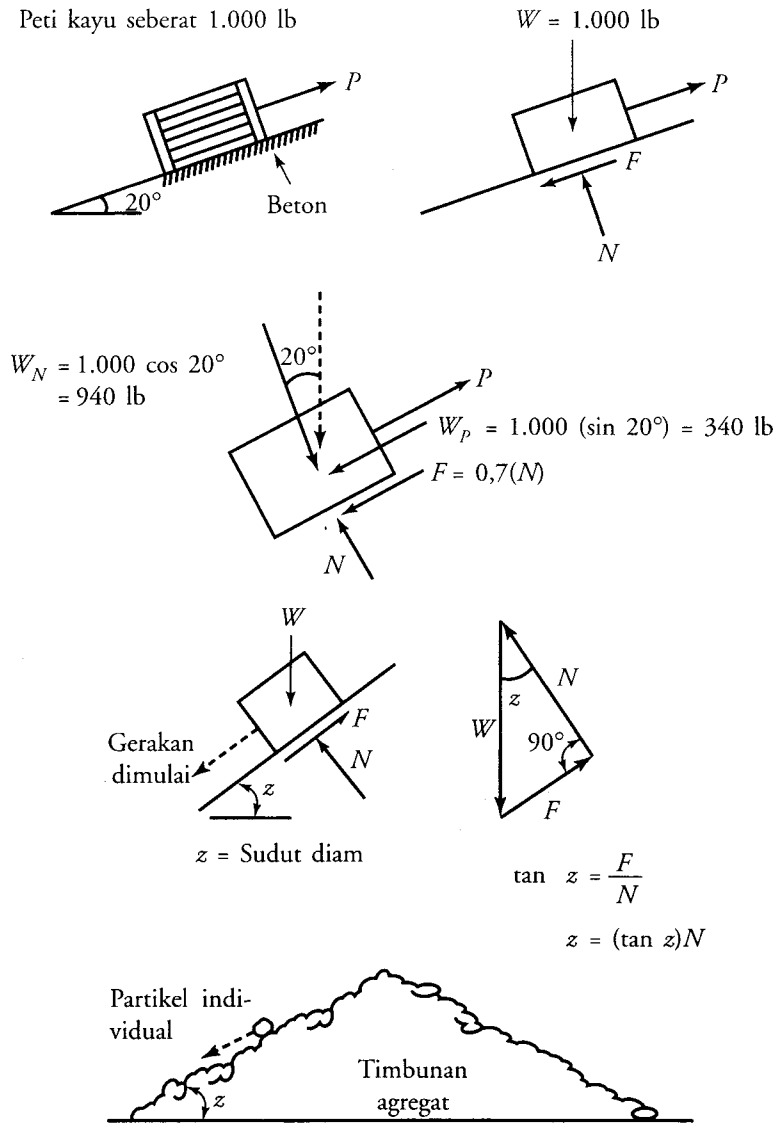
Peti kayu pada Gambar 1.8 memiliki isi seberat 1.000 lb. Kita ingin menentukan gaya P yang diperlukan untuk menarik peti itu ke atas permukaan beton dengan kemiringan 20°. Diagram beban dari peti memperlihatkan bahwa untuk menggerakkan peti ke atas daerah yang miring, gaya tarik yang diterapkan harus bisa mengatasi gaya gesek, F, pada permukaan antara kayu dan beton. Gaya tarik tersebut juga harus bisa mengatasi komponen berat dalam arah kemiringan W_P, di mana

$$W_P = 1.000 \times \sin(20°) = 340 \text{ lb}$$

Gaya gesek, F, yang melawan gerak dari peti, sebanding dengan gaya, N, yang bekerja untuk menjepit permukaan kasar kayu dan permukaan kasar beton. Kesetimbangan dari gaya-gaya yang bekerja dalam arah tegak lurus terhadap daerah yang miring menunjukkan bahwa gaya jepit tersebut setimbang dengan komponen berat yang tegak lurus dengan permukaan miring, W_N, di mana

$$W_N = N = 1.000 \times \cos(20°) = 940 \text{ lb}$$

Ketika gaya P perlahan-lahan bertambah, gaya gesek yang melawannya akan bertambah secara proporsional sampai gesekan maksimum antara kayu dan beton dapat diatasi—kemudian peti dapat meluncur. Gaya gesek maksimum yang dimungkinkan pada kasus dua bahan ini adalah sekitar 70% (kurang apabila permukaannya basah) dari gaya jepit, sehingga $F = 0{,}7 \times N$. Nilai 0,7 disebut sebagai koefisien gesek, yang harus ditentukan dengan percobaan antara dua bahan apapun yang berada dalam keadaan saling kontak. Koefisien ini umumnya berkisar dari 0,1 untuk permukaan-permukaan kontak yang mulus dan licin, hingga 0,9 apabila permukaan-permukaan kontaknya kasar.



GAMBAR 1.8

Dari diagram beban, kita melihat bahwa gaya-gaya yang bekerja pada peti, *W*, *F*, *N*, dan *P* membentuk sebuah sistem gaya yang konkuren. Sebelum peti meluncur, peti tidak bergerak, sehingga kita dapat menulis dua persamaan kesetimbangan gaya. Kedua komponen berat yang diketahui diperlihatkan dan gesekan dirumuskan dalam istilah-istilah gaya jepit yang tak diketahui, *N*. Jadi dua yang tak diketahui adalah *P* dan *N*.

Kita menambahkan gaya-gaya dalam arah tegak lurus terhadap permukaan miring dan menyamakannya menjadi nol:

$$N - 940 = 0$$

Jadi N = 940 lb, dan F = 0,7 × 940 = 660 lb. Lalu kita menjumlahkan gaya-gaya dalam arah P:

$$P - 340 - 660 = 0$$

Jadi, kita melihat bahwa kita perlu menarik peti dengan gaya P = 1.000 lb untuk mengatasi gesekan dan mulai mendorong peti ke atas daerah yang miring.

Koefisien gesekan di antara dua permukaan bahan apapun dengan mudah dapat ditentukan apabila salah satu dari bahan membentuk sebuah bidang datar yang dimiringkan, dan bahan lainnya yang berbentuk blok diletakkan di atasnya. Kita tertarik dengan koefisien ini terutama apabila kedua bahannya sama, seperti antara beton dan beton. Bidang dimiringkan pada nilai-nilai sudut z yang bertambah, seperti diperlihatkan pada gambar. sampai blok mulai meluncur. Apabila blok dan bidang berasal dari bahan yang sama, maka nilai sudut z pada titik ini disebut sudut diam, atau sudut gesek, dari bahan.

Seperti yang kita lihat pada gambar, ketiga gaya yang konkuren, W, N, dan F, berada dalam kesetimbangan sesaat sebelum terjadinya gerakan meluncur, dan ketiganya membentuk sebuah segitiga siku-siku yang mempunyai sudut z. Dengan penentuan secara trigonometris, tangen dari sudut z adalah rasio yang berlawanan terhadap sisi terdekat dari segitiga siku-siku tersebut:

$$\tan(z) = F/N$$

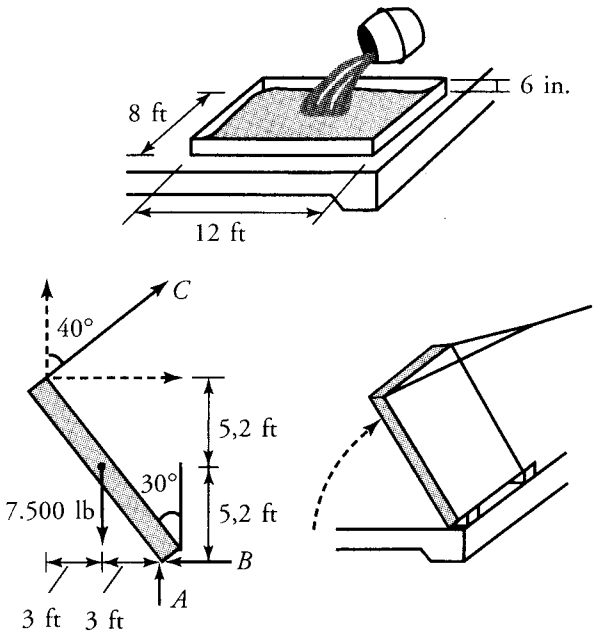
yang berarti bahwa,

$$F = \tan(z) \times N$$

Dengan membandingkan hal ini dengan apa yang telah kita bahas mengenai persoalan peti kayu, kita melihat bahwa koefisien gesek dari sebuah bahan secara sederhana ditentukan sebagai tangen dari sudut gesek.

Sudut ini dapat diamati, untuk bahan seperti tanah atau timbunan agregat, dengan membentuk sebuah timbunan, seperti terlihat pada gambar. Ketika tinggi dari timbunan tersebut bertambah, terlihat jelas bahwa ada batas atas untuk sudut kemiringan dari sisi-sisi timbunan, dan batas tersebut merupakan sudut gesekan bahan, z. Partikel tambahan apapun yang diletakkan di atas timbunan harus berperilaku seperti blok yang miring dan meluncur turun ke sisi dari timbunan—bidang tersebut—sehingga timbunan membentuk sebuah bentuk kerucut yang terus-bertambah dengan sisi-sisi yang menahan sebuah kemiringan yang konstan. Informasi ini sangat berguna dalam menghadapi persoalan tanah dan pondasi, karena sudut gesek dari tanah merupakan aspek penting yang berhubungan dengan kemampuan tanah untuk menyangga beban-beban struktural.

GAMBAR 1.9



Latihan Pada soal yang baru saja kita lihat, berapakah besar gaya yang diperlukan untuk mendorong peti di daerah yang miring ke arah bawah?

Untuk sebuah soal yang lebih dekat lagi sifatnya, tinjau berapakah besar gaya gesek yang diperlukan di antara kaki Anda dan kemiringan atap untuk mencegah Anda tergelincir jatuh dari atap dengan kemiringan 7 berbanding 12? ■

1.6 Panel Dinding-Miring

Gambar 1.9 menggambarkan teknik konstruksi dinding-miring (*tilt-wall*), yang merupakan sebuah metode konstruksi populer yang memungkinkan pendirian yang lebih cepat dari struktur-struktur bertingkat-sedikit yang memiliki dinding-dinding keliling yang luas seperti pusat perbelanjaan dan gudang. Kita akan melihat bahwa konsep momen merupakan bagian dari analisis gaya yang bekerja pada panel dinding-miring, karena gaya-gaya tersebut tidak lagi merupakan gaya-gaya yang konkuren.

Sebuah papan kayu persegi panjang diletakkan di atas lantai beton bangunan yang sedang dalam pembangunan, sehingga lantai sementara dapat berfungsi sebagai alas dari rangka kerja pencetak untuk dinding beton. Sebuah bahan kimia pelepas (*debonding chemical*) disemprotkan pada lantai beton untuk mencegah tuangan cetakan dinding beton yang baru menempel pada slab; lalu baja tulangan diletakkan di dalam papan rangka kerja pencetak persegi panjang dan cetakan beton basah dituangkan

sampai rata dengan bagian atas dari papan rangka kerja pencetak. Proses ini menghasilkan sebuah dinding yang biasanya memiliki ketebalan dari 6 in. hingga 12 in. Setelah mengeras, ujung panel dinding ditahan untuk mencegah dinding meluncur, dan sebuah derek memiringkan panel ke atas dengan sebuah kabel yang dipasang pada alat yang sebelumnya telah dimasukkan pada beton yang masih basah.

Pada satu saat dalam tahap pengangkatan-miring (*tilt-up*) dari sebuah panel dengan ketebalan 6 in, lebar 8 ft, dan panjang 12 ft, terlihat bahwa panel berada dalam sudut 30° dari sumbu vertikal, dan kabel pengangkat membentuk sudut sebesar 40° terhadap sumbu vertikal. Kita perlu menentukan semua gaya yang bekerja pada dinding. Gaya-gaya tidak diketahui yang bekerja pada dinding-miring adalah gaya kabel pengangkat C, reaksi ke atas dari tanah A, dan gaya yang dihasilkan blok-blok untuk menahan luncur lateral pada dasar panel B. Gaya aktif adalah tinggi dinding W, yang ditentukan dengan mengetahui bahwa berat satuan (kepadatan) dari beton adalah 150 lb/ft^3. Jadi, kita dapat menghitung berat panel dan menempatkannya pada pusat panel (dikenal sebagai pusat gaya berat). Dengan menambahkan sekitar 300 lb untuk memperhitungkan hasil cetakan beton yang kurang rata, beratnya adalah

$$W = 150 \text{ lb/ft}^3 \times \left(6 \text{ in.} \times \frac{1}{12} \text{ ft/in.} \times 8 \text{ ft} \times 12 \text{ ft}\right) + 300 = 7.500 \text{ lb}$$

Gaya-gaya (dan komponen-komponen gaya) yang bekerja pada dinding diperlihatkan pada diagram beban dalam gambar. Dengan menjumlahkan momen-momen di sekitar dasar dinding,

$$C \times \cos(40°) \times 6 + C \times \sin(40°) \times 10{,}4 - 7.500 \times 3 = 0$$

Kita dapatkan $C = 1.370$ lb. Penjumlahan gaya-gaya vertikal menghasilkan persamaan

$$1.370 \times \cos(40°) - 7.500 + A = 0$$

Jadi, $A = 6.450$ lb. Pada akhirnya, kesetimbangan gaya-gaya horisontal menunjukkan bahwa

$$B = 1.370 \times \sin(40°) = 880 \text{ lb}$$

Latihan

Kerjakan kembali soal ini dengan mengasumsikan bahwa panel dinding memiliki ketebalan 10 in. dan berada pada sudut 60° terhadap arah vertikal. Bagaimana apabila sudutnya 89°?

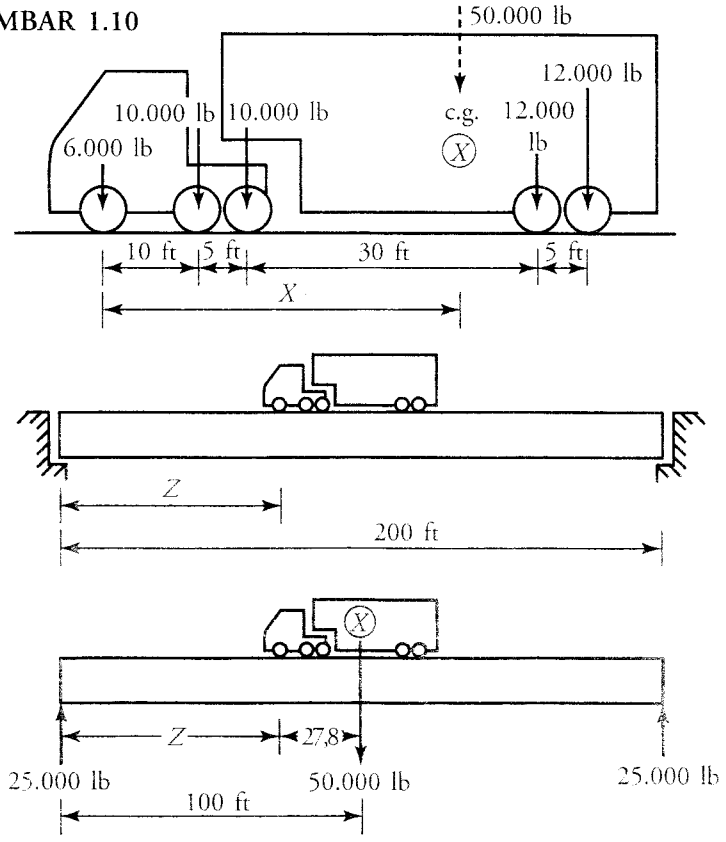
Dan, berapakah besar gaya yang diperlukan untuk mengangkat panel secara keseluruhan dari atas tanah? ■

1.7 Pusat Gaya Berat dari Sebuah Truk di atas Jembatan

Untuk menerapkan prinsip-prinsip kesetimbangan dalam menganalisis berbagai jenis struktur, kita perlu mengetahui istilah pusat gaya berat. *Pusat gaya berat* dari sebuah objek adalah titik di sekitar daerah di mana benda tersebut dapat menjadi setimbang dengan sempurna. Karena berat dari sebuah benda adalah beban struktural yang utama, maka kita perlu menemukan lokasi di mana berat beban ini bekerja secara efektif—itulah pusat gaya beratnya. Bagaimanapun arah benda, seutas tali yang dipasang pada titik tersebut dapat mengangkat benda tanpa menyebabkan benda tersebut menjadi miring. Pusat gaya berat seringkali disingkat menjadi c.g (*center of gravity*). Kita dapat menganggap sebuah kelompok beban sebagai sebuah benda, dan sekali lagi, c.g adalah titik di sekitar daerah di mana gaya total dari beban-beban struktural tersebut dapat secara efektif diasumsikan dalam keadaan bekerja.

Sebuah truk yang melintasi jembatan seperti diperlihatkan pada Gambar 1.10 dapat membantu kita dalam memvisualisasikan konsep dari pusat gaya berat. Perhatikan bahwa berat kelima as roda truk sebesar 50.000 lb tersebut dapat ditentukan dengan memajukan kendaraan

GAMBAR 1.10



tersebut secara perlahan-lahan dan mencatat bacaan (*reading*) dari timbangan (*scale*) pada stasiun pengamat di sisi jalan, setiap kali as roda melewati timbangan.

Kita akan menentukan lokasi dari pusat gaya berat truk terhadap as roda depan, X. Kemudian kita dapat menggunakan informasi ini untuk menentukan di mana as roda depan truk ini harus ditempatkan, Z, dari tembok pangkal (*abutment*) kiri dari jembatan sepanjang 200 ft sedemikian rupa sehingga menimbulkan reaksi-reaksi tumpuan yang sama sebesar 50.000/2 = 25.000 lb pada tembok pangkal kiri dan tembok pangkal kanan.

Sesuai definisinya, pusat gaya berat (pada gambar disingkat c.g) adalah titik di mana berat penuh sebesar 50.000 lb dari kendaraan secara efektif ditempatkan. Jadi, untuk menemukan titik ini, kita mengamati bahwa momen-momen dari berat as roda secara terpisah, terhadap as roda depan, harus sama dengan momen berat total di sekitar as roda depan, yaitu:

$$10.000(10) + 10.000(15) + 12.000(45) + 12.000(50) = 50.000(X)$$

Didapatkan X = 27,8 ft dari as roda yang pertama.

Untuk menempatkan as roda terdepan truk pada bentang jembatan sedemikian rupa sehingga menimbulkan reaksi-reaksi yang sama pada tembok-tembok pangkal, kita hanya mengamati bahwa kedua reaksi vertikal adalah sama, ketika pusat gaya berat dari truk berada di tengah bentang sepanjang 200 ft. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa

$$Z = 100 - 27{,}8 = 72{,}2 \text{ ft}$$

Latihan Dengan menggunakan tembok pangkal kiri sebagai titik referensi, buktikan kebenaran bahwa jumlah dari momen-momen kelima as roda sama dengan momen dari berat total sebesar 50.000 lb.

Kerjakan kembali soal ini dengan menghilangkan as roda terakhir dari gandengan, dan tentukan di mana seharusnya as roda terdepan truk ini ditempatkan untuk menimbulkan reaksi terbesar pada tumpuan kiri? ■

1.8 Beban-beban Gravitasi Merata

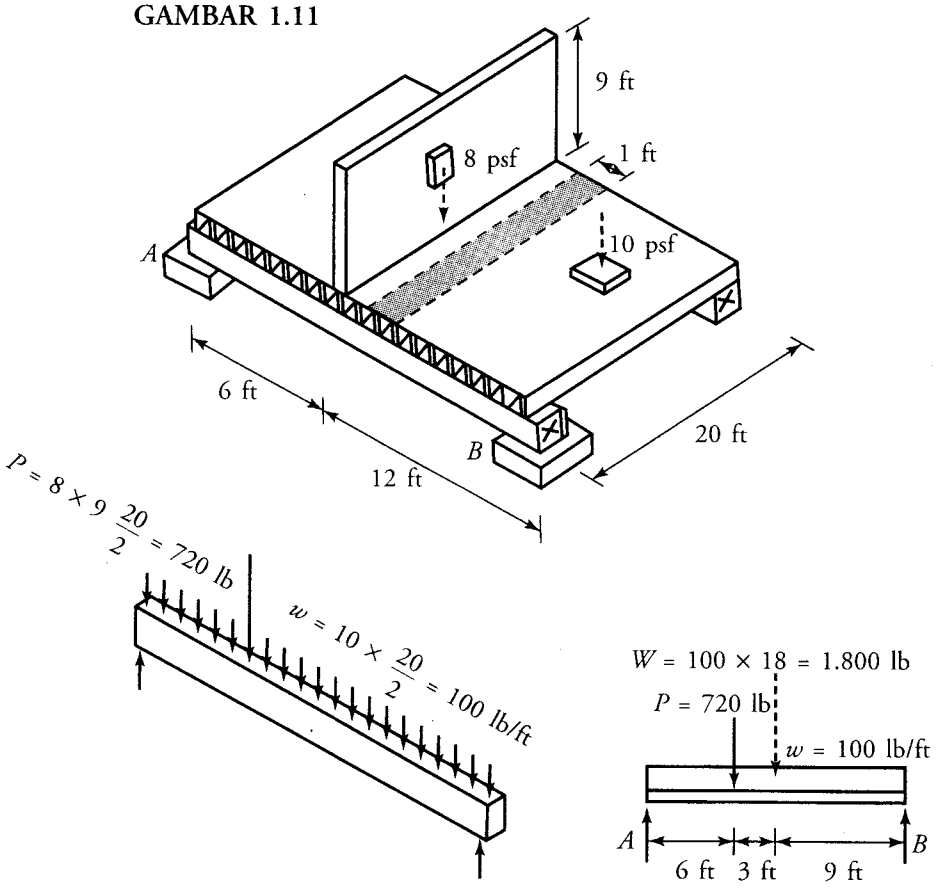
Salah satu situasi struktur yang umumnya sering terjadi adalah situasi-situasi mengenai beban-beban merata (distributed). Kita akan melihat banyak jenis beban dalam buku ini. Selain terpusat pada sebuah titik tertentu, suatu beban dapat juga merata di sepanjang badan sebagai serangkaian gaya dengan pengaruh total yang dapat dikatakan terjadi pada c.g dari beban merata tersebut.

MILIK
PERPUSTAKAAN
JAWA TIMUR

Balok lantai *AB* yang diperlihatkan pada Gambar 1.11 merupakan sebuah contoh yang bagus dari situasi seperti ini. Balok tersebut menumpu sebuah beban terpusat akibat dinding yang ditumpu balok tersebut dan balok itu juga menumpu serangkaian beban merata secara seragam yang dihasilkan oleh balok anak (*joist*) lantai yang menyalurkan gaya-gaya reaksi beban-beban tersebut. Kita ingin menentukan besar dari reaksi-reaksi tumpuan yang harus dihasilkan oleh blok-blok pondasi untuk menumpu balok *AB*, dan dalam proses tersebut, kita akan mulai berusaha untuk memahami bagaimana beban-beban dari sebuah struktur ditumpu oleh banyak elemen-elemen individual strukturnya. Untuk sementara, pada contoh ini kita hanya meninjau beban mati dinding dan beban mati lantai.

Balok *AB* memiliki panjang 18 ft dan menumpu sebuah dinding pada titik dengan jarak 6 ft dari ujung *A*. Dinding memiliki berat satuan sebesar 8 lb/ft^2 (psf), sehingga sebuah beban terpusat *P*, yang sama dengan setengah berat dinding total disalurkan ke balok *AB* melalui balok lain yang langsung menumpu dinding, dan

GAMBAR 1.11



$$P = \frac{1}{2} \times (8 \times 9 \times 20) = 720 \text{ lb}$$

Selain itu, balok *AB* juga menumpu balok-balok anak lantai (balok-balok yang lebih kecil) di setiap ft dari panjangnya. Tiap-tiap balok anak memikul setiap bagiannya dari beban lantai total. Bagian ini dikenal sebagai daerah pembebanan (*tributary area*) dan diperlihatkan pada gambar sebagai jalur lantai yang diarsir dengan lebar dalam ft. Setiap ft di setiap balok anak memikul setengah dari lantai antara balok anak tersebut dengan balok anak di sisi-sisinya. Karena balok anak berjarak 1 ft satu sama lain, maka setiap ft dari gelagar memikul sebuah area lantai penyokong seluas 1 ft $\times$ ($\frac{1}{2}$ + $\frac{1}{2}$) ft = 1 ft^2 dari lantai. Dengan berat lantai satuan sebesar 10 lb/ft^2, kita melihat bahwa berat total yang dipikul oleh sebuah balok anak dengan panjang 20 ft adalah 1 ft^2 $\times$ 10 lb/ft^2 $\times$ 20 ft = 200 lb. Karena balok anak ditumpu di tiap-tiap ujungnya, setengah dari beban ini disalurkan ke balok *AB*. Balok *AB* menumpu beban-beban balok anak yang serupa di setiap ft dari panjangnya yang menimbulkan sebuah beban merata yang seragam

$$w = \frac{200}{2} = 100 \textit{ pounds per linear foot} \text{ (lb/ft, atau plf)}$$

Untuk menentukan reaksi tumpuan di *A* dan *B*, kita perlu menggambarkan diagram beban untuk *AB* seperti yang terlihat pada gambar. Kita mengganti beban merata sepanjang 18 ft dengan sebuah gaya total dengan posisi di pusat gaya beratnya, yang dengan jelas terletak di tengah beban—9 ft dari ujung manapun. Dapat kita hitung sandaran (*resting*) dari balok anak di *AB*, atau dengan lebih sederhana dapat kita nyatakan bahwa beban per ft dikalikan dengan panjang beban menghasilkan gaya merata ekivalen total,

$$W = w \times L = 100 \text{ lb/ft} \times 18 \text{ ft} = 1.800 \text{ lb}$$

Pada akhirnya, kita menerapkan persamaan kesetimbangan gaya vertikal dan persamaan momen. Dengan menjumlahkan momen-momen di *A*,

$$720 \times 6 + 1.800 \times 9 - B \times 18 = 0$$

Didapatkan B = 1.140 lb. Dengan menjumlahkan gaya-gaya vertikal, maka terlihat bahwa

$$A = 720 + 1.800 - 1.140 = 1.380 \text{ lb}$$

Latihan

Kerjakan kembali soal tersebut dengan dinding secara keseluruhan dihilangkan, tetapi selain beban-beban mati yang telah diberikan ditempatkan juga sebuah beban hidup sebesar 40 psf pada lantai.

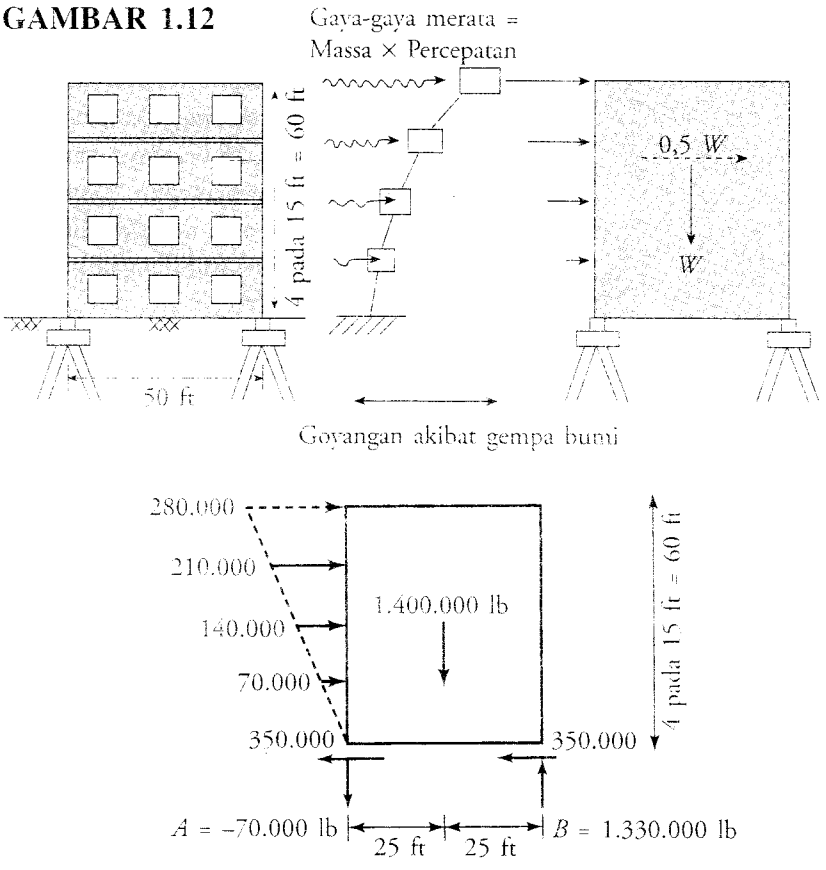
Kerjakan kembali soal ini dengan mengasumsikan bahwa selain beban-beban mati yang telah diberikan, terdapat sebuah beban hidup sebesar 40 psf, dan tinggi dinding adalah 12 ft. ■

1.9 Beban Lateral Merata

Gambar 1.12 memperlihatkan sebuah struktur bertingkat banyak yang mengalami beban lateral yang disebabkan oleh gerakan tanah bolak-balik yang cepat, akibat gempa bumi. Beban-beban lateral dihasilkan oleh massa bangunan yang besar yang menahan gerakan tanah lateral secara mendadak. Ini menyebabkan sebuah beban lateral pada struktur bangunan, yang dalam beberapa gempa bumi yang parah, berat beban lateral tersebut dapat seberat bangunan itu sendiri!

Pada waktu goyangan tanah akibat gempa bumi terjadi, bangunan yang masif akan mulai bergoyang bolak-balik secara cepat, dengan tingkat-tingkat yang lebih tinggi akan mengalami goyangan bolak-balik terbesar. Dalam goyangan ke satu sisi lalu ke sisi lainnya tersebut, sebuah benda harus mengalami perubahan-perubahan kecepatan secara mendadak, yang

GAMBAR 1.12



disebut percepatan, dan dari ilmu fisika kita mengetahui bahwa sebuah massa mempercepat kecepatannya akibat bekerjanya sebuah gaya pada massa tersebut.

Pada sebuah bangunan yang masif, percepatan bolak-balik dari massa bangunan menghasilkan sebuah beban lateral yang tersebar pada tingkat atap dan tiap-tiap lantai di sepanjang tinggi bangunan, karena di sinilah adanya konsentrasi massa lantai dan massa atap. Tingkat-tingkat yang lebih tinggi menerima porsi beban lateral yang lebih besar, karena mengalami percepatan-percepatan yang terbesar ketika struktur mengalami goyangan bolak-balik.

Untuk bangunan yang mengalami gempa bumi yang kuat ini, gaya lateral total diperkirakan menyamai 50% dari berat struktur itu sendiri. Gaya-gaya lateral di tiap-tiap tingkat dari bangunan bertingkat-empat tersebut diperlihatkan pada gambar, beserta dimensi-dimensi bangunan dan berat bangunan keseluruhan. Kita ingin mengetahui berapakah besar gaya yang diperlukan untuk mempertahankan bangunan tetap tersambung dengan pondasinya di titik A, dan berapakah persentase dari penambahan beban pondasi yang terjadi di titik B sebagai hasil dari sebuah goyangan bolak-balik ke kiri dan ke kanan akibat gempa bumi.

Diagram beban diperlihatkan dengan reaksi pada A yang diasumsikan di sini tampak menarik struktur ke arah bawah, di mana struktur memiliki kecenderungan untuk roboh dalam arah beban-beban lateral. Bangunan memiliki berat $W = 1.400.000$ lb, dengan pusat gaya beratnya terletak di pusat volume bangunan. Beban lateral total yang diperkirakan terjadi akibat gempa bumi terparah yang mungkin terjadi adalah $0{,}5 \times W = 700.000$ lb, dan beban lateral total tersebut secara vertikal tersebar seperti yang terlihat pada gambar. Beban lateral total diasumsikan secara sama ditahan oleh pondasi-pondasi di A dan B, dan kita dapat menentukan gaya-gaya pondasi vertikal di A dan B dengan menjumlahkan momen-momen di B:

$$70.000(15) + 140.000(30) + 210.000(45) + 280.000(60) + A(50) - 1.400.000(25) = 0$$

Dari sini kita dapatkan $A = -70.000$ lb. Ini menunjukkan bahwa pondasi di A mendorong ke arah atas untuk menumpu struktur, dan bukannya menarik ke arah bawah untuk mencegah guling (*overturning*), seperti yang kita duga. Jadi, apabila struktur tersebut hanya ditumpu oleh tumpuan A tanpa diikat secara vertikal ke pondasi, bangunan tidak akan roboh akibat gempa bumi ini. Dengan menjumlahkan gaya-gaya vertikal, kita melihat bahwa,

$$B - 1.400.000 - (-70.000) = 0$$

Reaksi vertikal di B adalah 1.330.000 lb.

Tanpa adanya beban lateral, baik A maupun B secara sama berbagi beban bangunan seberat 1.400.000 lb. Oleh karena itu, gempa bumi bertambah dari B = 700.000 lb menjadi B = 1.330.000 lb, yang merupakan pertambahan sebesar

$$\left(\frac{1.330.000}{700.000}\right) \times 100\% = 90\%$$

Anda mungkin tertarik untuk mengetahui bahwa beban-beban lateral akibat angin dapat sebesar gaya-gaya gempa bumi sedang, terutama untuk struktur-struktur tinggi yang mengalami hembusan angin dengan kecepatan yang bertambah besar pada ketinggian yang lebih tinggi. Untuk struktur-struktur yang tinggi, beban-beban angin tersebut serupa seperti pada gaya-gaya gempa bumi. Untuk bangunan-bangunan lebih rendah yang terdiri dari beberapa tingkat saja, angin biasanya didistribusikan secara seragam di sepanjang tinggi bangunan.

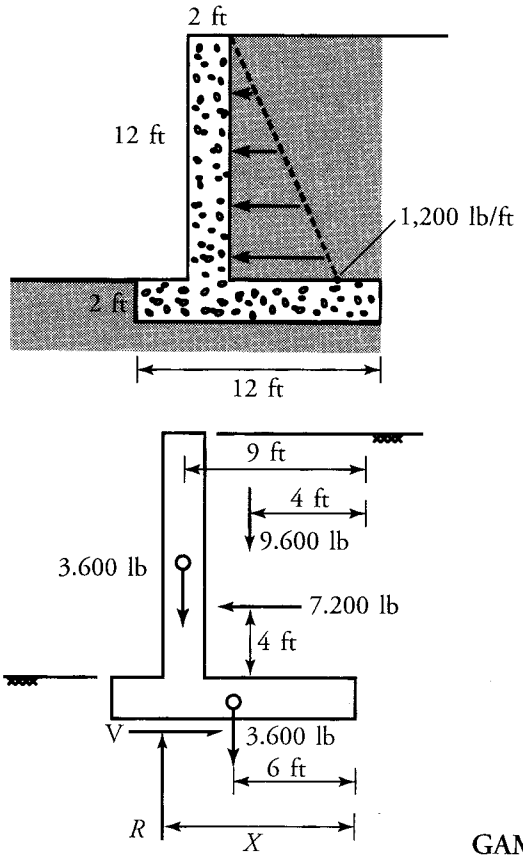
Latihan Alih-alih menggunakan empat gaya lateral individual, kerjakan kembali soal ini dengan menempatkan beban lateral total pada pusat gaya berat (c.g) dari keempat beban merata.

Kerjakan kembali soal ini dengan mengasumsikan bahwa bangunan terdiri dari enam tingkat, dan berat bangunan bertambah secara proporsional.

Kerjakan kembali soal ini apabila jarak antara tumpuan-tumpuan dikurangi dari 50 ft menjadi 40 ft. ■

1.10 Dinding Penahan

Sebuah dinding penahan, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1.13, berdiri dan mempertahankan sebuah perbedaan dari ketinggian-ketinggian tanah. Kita akan mempelajari nanti, bahwa jenis struktur dinding penahan ini terdiri dari sebuah dinding vertikal yang secara kaku dihubungkan dengan sebuah dasar horisontal lebar, yang disebut dinding kantilever. Pada contoh ini, di mana perbedaan ketinggian sebesar 12 ft dipertahankan, struktur mengikuti tekanan tanah lateral akibat massa yang tinggi di belakang dinding vertikal yang secara tidak natural ditahan pada sebuah kemiringan vertikal yang curam. Tekanan tanah lateral ini cenderung memiringkan dinding ke arah luar dari tanah yang ditahan. Ini mengakibatkan bagian dasar di belakang dinding atau tumit (*heel*) cenderung terangkat, dan dasar di depan dinding atau ujung dinding



GAMBAR 1.13

(*toe*) cenderung tertekan ke bawah, seperti halnya kaki dari seseorang yang melangkah maju.

Potongan penampang dinding sebesar 1 ft biasanya ditinjau untuk tujuan analisis. Tekanan lateral tanah pada dinding bertambah dengan tiap-tiap pertambahan ft kedalaman di bawah permukaan tanah yang lebih tinggi, dan pada contoh ini, mencapai beban maksimum sebesar 1.200 lb/ft, seperti yang terlihat pada gambar. Gaya lateral total dapat dihitung sebagai daerah beban merata segitiga:

$$V = \frac{1}{2} \times 12 \text{ ft} \times 1.200 \text{ lb/ft} = 7.200 \text{ lb}$$

Gaya ini terletak di pusat gaya berat dari beban merata segitiga, yaitu sepertiga jarak dari ujung yang besar dari segitiga, atau 4 ft di atas dasar. (Coba lihat apabila Anda dapat membuktikan kebenaran lokasi tersebut sebagai lokasi dari pusat gaya berat/c.g.) Beban-beban lain yang bekerja pada struktur adalah berat dinding dan berat dasar, yang dihitung masing-masing seberat 3.600 lb, dan blok tanah di belakang dinding di atas tumit seberat 9.600 lb yang akan menekan ke bawah dan mencegah tumit terangkat.

Untuk gaya-gaya reaktif, gaya lateral, V = 7.200 lb harus ditahan oleh gaya gesek yang sama besar dan berlawanan arah antara dasar dinding dengan tanah. Semua gaya ke arah bawah ditahan oleh reaksi vertikal R seperti yang terlihat pada gambar. Yang menjadi perhatian utama kita adalah penempatan posisi dari reaksi vertikal ini. Kita akan melihat nantinya bahwa reaksi ini akan bekerja pada sepertiga lebar dasar ke arah tengah, kalau tidak, dasar tumit akan terangkat ke atas dari tanah, dan hal ini akan meningkatkan kemungkinan terjadinya guling pada struktur dinding penahan. Dengan menjumlahkan gaya-gaya secara vertikal, kita menemukan

$$R = 3.600 + 3.600 + 9.600 = 16.800 \text{ lb}$$

Kita dapat menempatkan reaksi R, pada sebuah jarak X dari tumit dengan menjumlahkan momen-momen di sekitar ujung tumit

$$16.800(X) - 9.600(4) - 7.200(4) - 3.600(6) - 3.600(9) = 0$$

Kita melihat bahwa X = 7,7 ft, dan berada pada jarak sepertiga dari dasar dan kita melihat bahwa nilai X dapat berkisar dari 4 ft sampai dengan 8 ft. Jadi reaksi berada dalam batas-batas yang diinginkan.

Latihan

Kerjakan kembali soal ini dengan mengasumsikan bahwa *stem* memiliki panjang 16 ft, dan tekanan tanah lateral pada dasar stem adalah 1.000 lb/ft.

Kerjakan kembali soal ini dengan mengansumsikan bahwa porsi dari ujung dinding (*toe*) dihilangkan, sehingga struktur memiliki bentuk-L. ■

2 KOMPONEN-KOMPONEN STRUKTUR

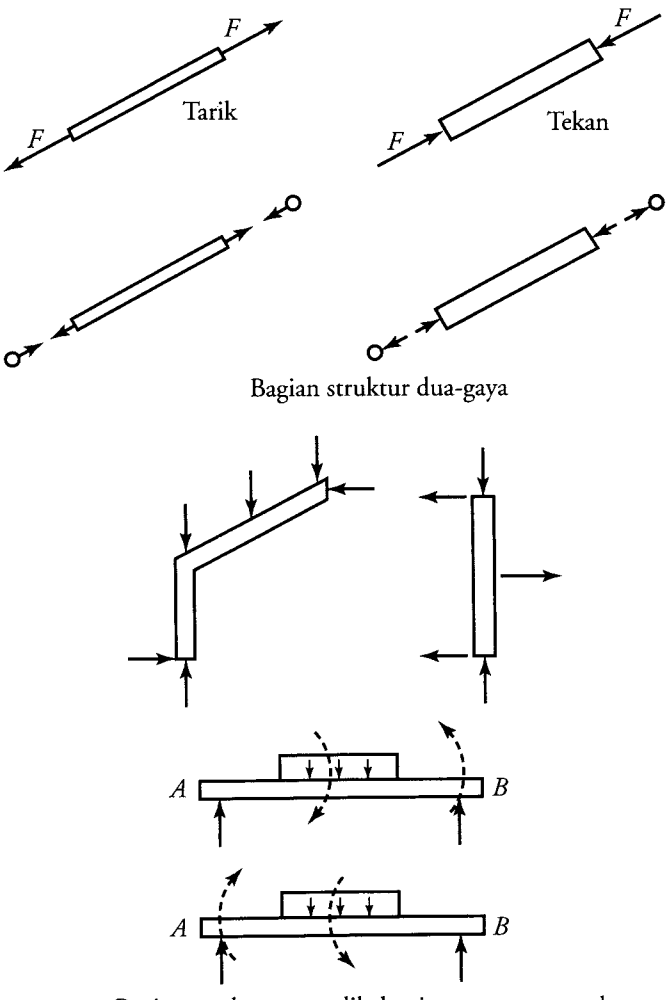
2.1 BAGIAN-BAGIAN STRUKTUR

Terdapat dua jenis bagian struktur utama yang akan menjadi perhatian kita dalam studi mengenai dasar-dasar struktur: bagian struktur dua-gaya dan bagian struktur yang dibebani secara transversal. Kita melihat pada Gambar 2.1 bahwa bagian struktur dua-gaya hanya memiliki dua gaya yang bekerja pada bagian struktur tersebut. Kedua gaya berbagi garis kerja yang sama, sama besar, dan berlawanan satu sama lain. Kedua gaya tersebut diarahkan di sepanjang sumbu longitudinal (yaitu, di sepanjang bagian struktur yang lurus) dan disebut beban-beban aksial.

Apabila gaya-gaya menarik bagian struktur pada kedua ujungnya, maka bagian struktur tersebut berada dalam keadaan tarik. Tali, kabel, rantai, atau elemen-elemen struktur yang ramping lainnya hanya dapat menumpu beban-beban tarik—Anda tidak dapat mendorong sesuatu dengan seutas tali. Apabila kedua gaya mendorong pada ujung-ujungnya, maka bagian struktur tersebut berada dalam keadaan tekan dan disebut sebagai *kolom*. Untuk menumpu beban-beban tekan, sebuah bagian struktur harus kekar (*stocky*)—anggota struktur tersebut harus memiliki luas penampang melintang substansial dibanding dengan panjangnya—karena jika tidak, bagian struktur tersebut cenderung mengalami tekuk. Perhatikan pada gambar bahwa bagian-bagian struktur tarik mengalami reaksi dengan menarik kedua benda yang tersambung dengan bagian-bagian struktur tersebut, sedangkan bagian struktur tekan, memberikan tekanan pada kedua benda.

Kita melihat pada gambar bahwa elemen-elemen struktur yang dibebani secara transversal menumpu beban-beban yang bekerja dalam suatu sudut terhadap sumbu longitudinal dari bagian struktur. Bagian struktur lurus yang dibebani secara transversal disebut *balok*, yang merupakan sebagian besar dari bagian struktur yang dibebani secara transversal. Balok dapat memiliki banyak nama, seperti balok anak (*joist*), balok utama (*girder*), kasau atau usuk (*rafter*), dan purlin. Balok dapat menumpu gaya-gaya aksial, dan apabila gaya aksial merupakan gaya dalam tekan, elemen struktur itu disebut *balok-kolom*.

Tidak seperti bagian struktur dua-gaya, terdapat lebih dari dua gaya pada sebuah balok, karena jarak antara dua gaya transversal membentuk



GAMBAR 2.1

sebuah momen dan sebuah lengan tuas relatif yang harus ditahan oleh beban lain yang menghasilkan-momen. Jadi kita melihat pada gambar bahwa di titik *A* dari balok, momen yang searah jarum jam dari beban merata yang diterapkan, dibalas oleh sebuah momen yang diakibatkan oleh gaya reaksi di *B*. Demikian juga momen-momen di *B*, kita melihat bahwa momen yang berlawanan arah jarum jam dari beban merata harus disamakan oleh momen searah jarum jam akibat reaksi *A*, yang menunjukkan bahwa pastinya terdapat lebih daripada hanya dua beban transversal pada balok.

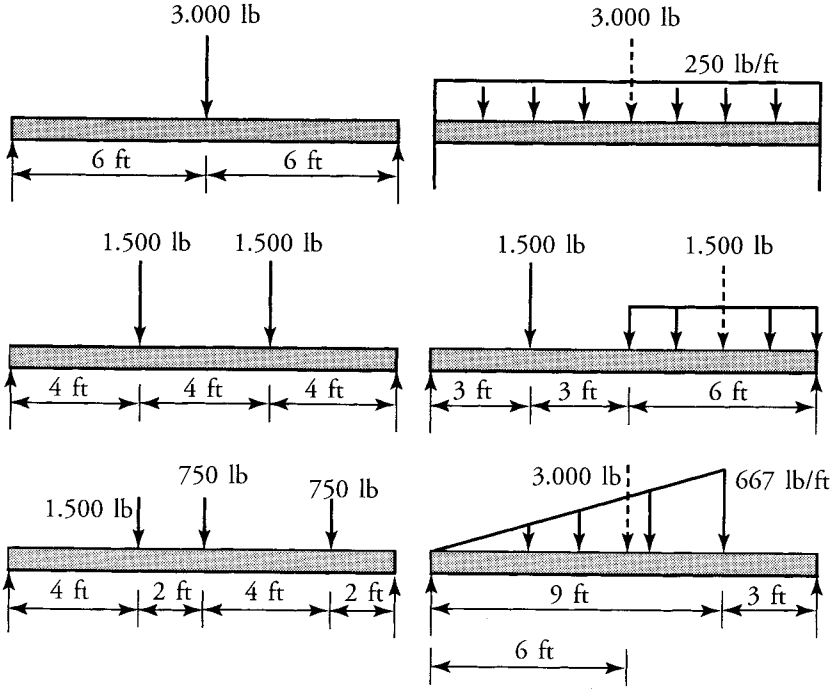
Struktur adalah sistem yang terdiri dari susunan bagian struktur dua-gaya dan/atau elemen-elemen struktur yang dibebani secara transversal. Bagian struktur umumnya berbentuk lurus, dengan pengecualian untuk bagian struktur dari bentuk struktur lengkungan dan struktur rangka

Dalam bab ini, kita berhadapan dengan komponen-komponen struktur yang umum: balok, kabel, lengkungan, dan kolom. Kita secara singkat juga membahas berbagai jenis sambungan yang digunakan untuk menyatukan elemen-elemen tersebut menjadi sebuah sistem struktur lengkap yang mampu menahan-beban. Pada bab berikutnya, kita akan melihat susunan-susunan struktur yang paling umum dari elemen-elemen struktur ini yaitu: struktur rangka batang (*truss*), struktur rangka, dan struktur diafragma.

2.2 BALOK

Balok menumpu beban-beban dalam sebuah jarak yang disebut bentang. Perilaku dari elemen-elemen dan susunan-susunan struktur lainnya seperti kabel, lengkungan, rangka batang, rangka, dan diafragma, seringkali dijelaskan pertama-tama oleh penggambaran yang sama seperti halnya untuk balok. Kita telah membahas analisis kesetimbangan dari beberapa contoh balok sederhana, dan kita hanya akan sedikit mengembangkannya.

Hal yang secara mendasar membedakan balok yang satu dengan yang lainnya adalah peletakan dari beban-beban di sepanjang bentang, dan lokasi tumpuan serta jenis tumpuan. Gambar 2.2 memperlihatkan beberapa cara untuk beban seberat 3.000 lb agar dapat diterapkan pada sebuah balok



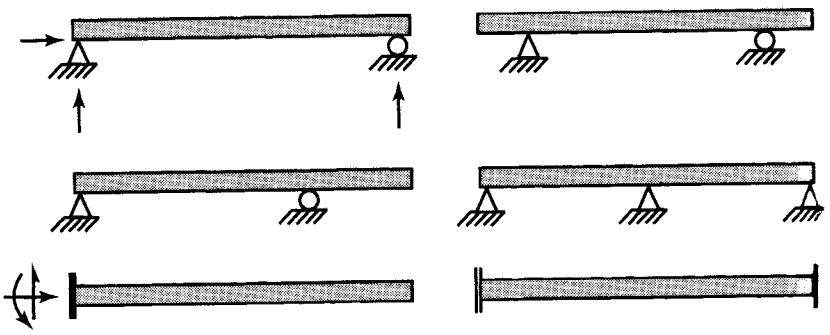
GAMBAR 2.2

sederhana. Beban-beban balok dapat merupakan sebuah gaya terpusat, atau sebuah beban yang merata pada beberapa bagian dari balok. Reaksi-reaksi tumpuan ujung terjadi secara sama, masing-masing sebesar 1.500 lb untuk semua balok yang terlihat pada gambar. Dapatkah Anda membuktikan kebenarannya? Ketika beban-beban aktif dan beban-beban reaktif besarnya sama untuk setiap balok, cara beban tersebar pada sebuah balok mempengaruhi intensitas dari gaya-gaya internal dan deformasi yang dialami oleh bahan dari balok. Secara umum dapat dikatakan bahwa beban-beban terpusat memiliki efek yang lebih besar pada sebuah balok dibandingkan dengan beban-beban merata.

Gambar 2.3 memperlihatkan beberapa kemungkinan dari berbagai jenis dan susunan tumpuan balok serta reaksi-reaksi tumpuan balok yang terkait dengan jenis dan susunan tumpuan tersebut. Bentuk segitiga melambangkan apa yang disebut sebagai *tumpuan sendi* (*pin support*). Sendi menghasilkan komponen-komponen gaya reaksi transversal dan komponen-komponen gaya reaksi longitudinal. Sendi tidak dapat menahan rotasi, jadi tidak ada momen reaktif pada sebuah tumpuan sendi. Lingkaran melambangkan sebuah rol (*roller*) yang menghasilkan reaksi balok transversal, tetapi tidak dapat menghasilkan gaya reaktif dalam arah longitudinal, atau reaksi momen. Bagian struktur yang paling umum adalah sebuah balok yang diberi tumpuan sendi pada satu ujung dari bentang, dan diberi tumpuan rol pada ujung yang lainnya. Balok ini disebut sebagai *balok sederhana*. Rol memungkinkan balok untuk mengalami pengembangan dan penyusutan sebagai respons terhadap perubahan suhu, sehingga merupakan hal yang umum jika kita melihat tumpuan-tumpuan balok terekspos terhadap elemen-elemen struktur, seperti balok utama jembatan.

Garis tebal melambangkan sebuah tumpuan yang secara penuh mengekang balok, yang disebut *ujung jepit* (*fixed end*). Ujung jepit menghasilkan komponen-komponen gaya reaktif longitudinal dan komponen-komponen gaya reaktif transversal, serta sebuah momen reaksi. Momen reaksi yang menahan rotasi ini sebenarnya merupakan sepasang

GAMBAR 2.3



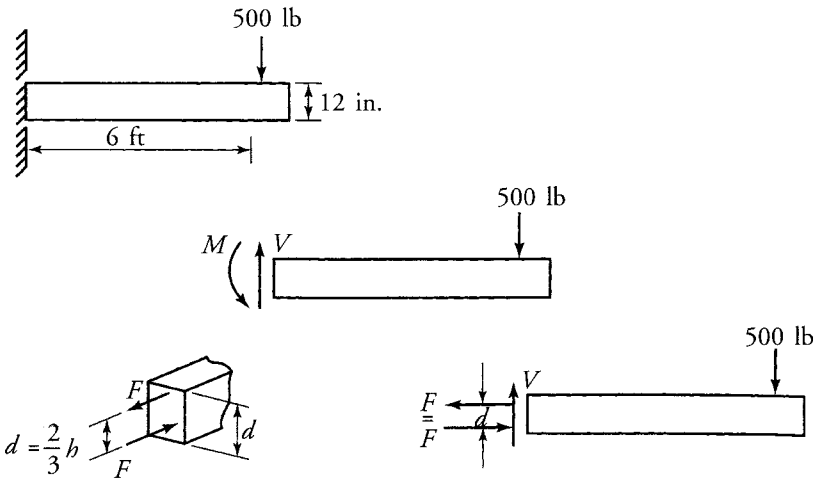
gaya melawan yang paralel, F, yang dipisahkan oleh sebuah lengan tuas, d, untuk membentuk apa yang disebut sebagai *kopel momen*. Nama tersebut mengacu pada momen, $M = F \times d$, yang dihasilkan oleh sepasang, atau kopel, dari gaya-gaya setimbang seperti terlihat pada Gambar 2.4. Sebuah balok yang ditumpu oleh sebuah ujung jepit dengan ujung lainnya bebas disebut sebagai *balok kantilever*. Kita nantinya akan melihat dalam buku ini detail-detail aktual dari tumpuan sendi, tumpuan rol, dan tumpuan jepit dalam pembahasan mengenai sambungan-sambungan.

Kombinasi beban balok dan susunan-susunan tumpuan tidak terbatas jumlahnya. Kita hanya akan menyelidiki balok-balok dengan tiga gaya yang tak diketahui dan/atau kopel-kopel gaya reaksi tumpuan yang tak diketahui. Balok-balok ini disebut *balok-balok tentu*, karena ketiga reaksi tumpuan dapat ditentukan dengan menerapkan ketiga persamaan kesetimbangan. Dengan lebih dari tiga reaksi tumpuan, sebuah balok dapat disebut *balok tak tentu*, dan ketiga persamaan kesetimbangan tidak mencukupi untuk menyelesaikan semua reaksi.

Pada Gambar 2.3, balok dua-bentang dengan tiga sendi disebut sebagai balok menerus dan memiliki enam reaksi tumpuan yang tak diketahui. Balok yang dijepit pada kedua ujungnya (disebut jepit-jepit) juga memiliki enam reaksi tumpuan. Karena terdapat lebih dari tiga reaksi pada kasus-kasus tersebut, balok-balok tersebut merupakan balok-balok tak tentu. Balok-balok seperti itu memerlukan pendekatan analisis lebih lanjut atau penggunaan asumsi-asumsi yang disederhanakan, seperti akan kita lihat nanti dalam buku ini.

Anggaplah kita menganalisis balok kantilever pada Gambar 2.4. Balok tersebut memiliki tinggi 12 in, bentang 6 ft, dan memikul beban terpusat

GAMBAR 2.4



seberat 500 lb pada ujung balok yang bebas. Tidak ada beban aksial yang diterapkan pada balok, seperti yang biasanya terjadi. Jumlah dari gaya-gaya horisontal harus sama dengan nol, sehingga tidak ada reaksi gaya aksial pada dinding. Reaksi gaya vertikal pada dinding, V, harus sebesar 500 lb ke arah atas untuk melawan beban yang diterapkan. Apabila kita memilih untuk menjumlahkan momen-momen pada dinding, kita melihat bahwa gaya, V, tidak menimbulkan momen. Kopel momen, $M = F \times d$, harus melawan gaya sebesar 500 lb yang bekerja dengan sebuah lengan tuas sepanjang 6 ft, sehingga $M = 500 \times 6 = 3.000$ ft-lb, yang ekivalen dengan $M = 36.000$ in-lb.

Kita akan melihat nanti bahwa lengan tuas kopel dari sebuah balok dengan penampang melintang persegi panjang solid, d, adalah dua per tiga tinggi balok, $h = 12$ in., sehingga

$$d = \frac{2}{3} \times 12 = 8 \text{ in.}$$

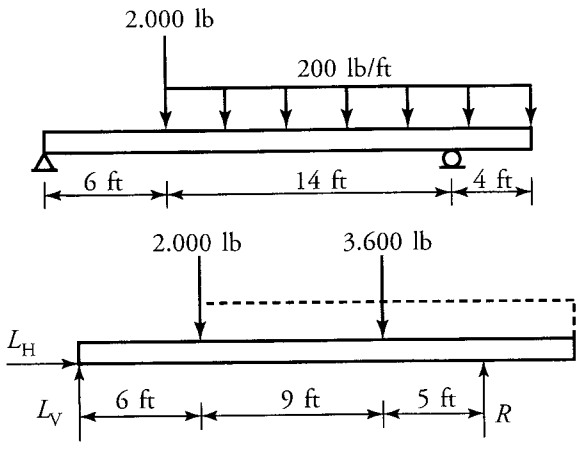
Kedua gaya kopel adalah

$$F = \frac{M}{d} = \frac{36.000}{8} = 4.500 \text{ lb}$$

Jadi, beban yang diterapkan menghasilkan reaksi geser $V = 500$ lb pada tumpuan dinding dan gaya kopel lentur yang mengejutkan $F = 4.500$ lb. Apabila tinggi balok, h, ditambahkan menjadi 24 in., menjadi berapakah besar gaya-gaya kopel?

Coba kita tinjau sebuah balok yang lain pada Gambar 2.5. Panjang keseluruhan balok adalah 24 ft, dan terdapat bagian yang tergantung (*overhang*) sepanjang 4 ft di ujung sebelah kanan. Tumpuan sebelah kiri, L, merupakan tumpuan sendi dan tumpuan kanan, R, merupakan tumpuan rol. Sebuah beban yang terpusat ke arah bawah seberat 2.000 lb terletak 6

GAMBAR 2.5



ft dari tumpuan sebelah kiri, dan beban merata seberat 200 lb/ft (plf) terletak 6 ft dari tumpuan sebelah kiri dan memanjang ke arah ujung sebelah kanan dari bagian struktur.

Balok digambarkan kembali dengan semua aksi dan reaksi yang direpresentasikan sebagai gaya-gaya terpusat. Beban merata digantikan dengan sebuah gaya ekivalen sebesar 200 lb/ft × 18 ft = 3.600 lb yang terletak di tengah kisaran beban yang terdistribusi secara uniform, yang menempatkannya 15 ft dari tumpuan kiri. Sekali lagi, komponen reaksi horisontal pada tumpuan sendi kiri, L_H, adalah nol karena tidak adanya gaya horisontal yang bekerja pada balok ini. Hal ini mengakibatkan persamaan kesetimbangan gaya horisontal terpenuhi. Jadi sekarang hanya tersisa dua persamaan, cukup untuk menyelesaikan dua reaksi tak diketahui yang tersisa, L_V dan R. Persamaan-persamaan dari gaya-gaya vertikal dan momen-momen di sekitar tumpuan kiri secara berurutan adalah

$$L_V - 2.000 - 3.600 + R = 0$$
$$(6)(2.000) + (15)(3.600) - (20)(R) = 0$$

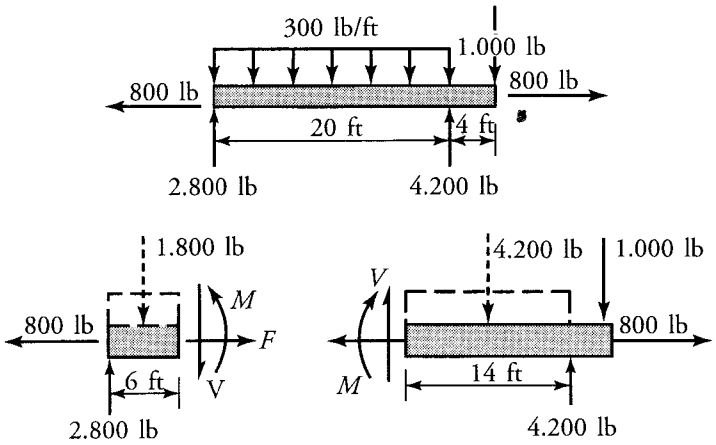
Didapatkan L_V = 2.300 lb dan R = 3.300 lb.

Apa yang terjadi apabila bagian yang tergantung sepanjang 4 ft diperpanjang 10 ft, dan beban terpusat seberat 2.000 lb dihilangkan?

2.3 Reaksi-reaksi Internal dengan Metode Potongan

Kita akan melihat nanti dalam buku ini bahwa untuk menganalisis dan/atau mendesain balok, kita perlu mengetahui apa saja yang terjadi pada setiap titik sepanjang bagian struktur. Apabila kita telah mengetahui reaksi-reaksi tumpuan untuk sebuah balok, kita dapat memeriksa titik manapun di sepanjang bagian struktur dan menentukan reaksi-reaksi internal. Apabila seluruh balok berada dalam kesetimbangan, bagian manapun dari bagian struktur tersebut juga berada dalam keadaan setimbang. Pada beberapa penampang di sepanjang balok, kita dapat secara fiktif memotong bagian struktur tersebut menjadi dua bagian, seperti yang terlihat pada Gambar 2.6. Setengah bagian sebelah kiri dikekang dari pergerakan rotasional, vertikal, dan horisontal oleh setengah bagian sebelah kanan, begitu pula sebaliknya.

Memotong bagian struktur pada sebuah penampang untuk menentukan tiga reaksi internal yang tak diketahui dikenal sebagai *metode potongan* (*method of sections*). Dengan menggunakan salah satu dari setengah bagian kiri atau setengah bagian kanan (biasanya setengah bagian sebelah kiri), tiga persamaan kesetimbangan diselesaikan untuk tiga reaksi internal. Ketiga reaksi internal yang terlihat dengan memotong bagian struktur adalah



GAMBAR 2.6

gaya longitudinal (gaya aksial, *F*), gaya transversal (gaya geser, *V*), dan kopel internal atau momen lentur, *M*.

Ketiga reaksi internal tak diketahui, *F*, *V*, dan *M* pada sebuah penampang yang terletak 6 ft dari tumpuan sebelah kiri ditentukan dengan menerapkan persamaan-persamaan kesetimbangan untuk gaya-gaya horisontal, gaya-gaya vertikal, dan momen-momen di sekitar penampang yang terpotong dari setengah bagian sebelah kiri balok sebagai berikut:

$$F - 800 = 0: \quad F = +\,800 \text{ lb}$$

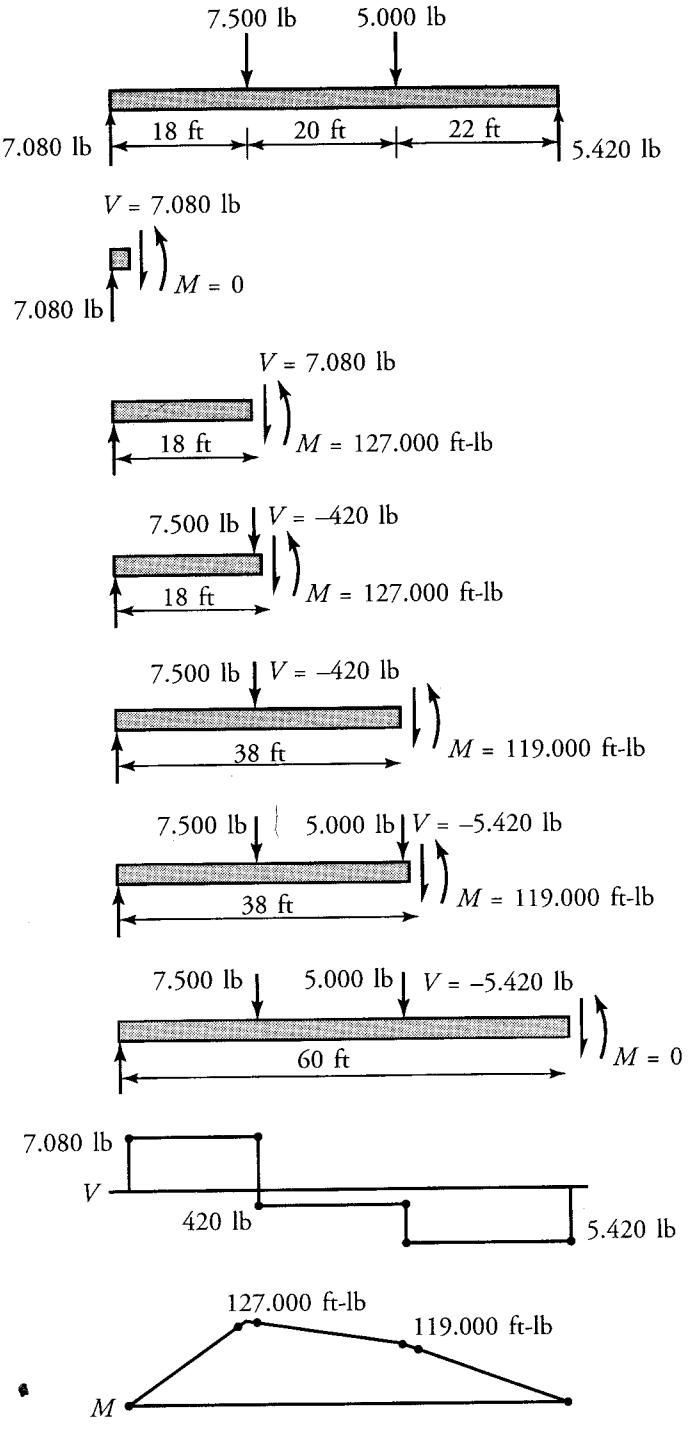
$$2.800 - 1.800 - V = 0: \quad V = +\,1.000 \text{ lb}$$

$$2.800(6) - 1.800(3) - M = 0: \quad \text{M} = +\,11.400 \text{ ft-lb}$$

Reaksi-reaksi internal diperlihatkan bekerja dalam bentuk positif: Gaya-gaya tarik aksial adalah positif; geser yang mendorong ke arah bawah pada setengah bagian sebelah kiri dari sebuah balok yang terpotong dianggap positif; dan momen yang merotasi setengah bagian sebelah kiri berlawanan arah jarum jam juga positif. Apabila solusi untuk sebuah reaksi adalah negatif, hal ini hanya menunjukkan bahwa reaksi bekerja berlawanan dengan arah positif yang diasumsikan.

Anda mungkin ingin mempraktekkan metode potongan dengan menentukan reaksi-reaksi internal pada beberapa titik di sepanjang balok ini.

Kita akan secara khusus memperhatikan nilai geser yang bergantung satu dengan yang lainnya, *V*, dan nilai momen lentur, *M*, serta bagaimana nilai geser dan nilai momen tersebut bervariasi di sepanjang balok. Gaya aksial, *F*, tidak bergantung pada kedua reaksi ini, dan kita akan membahas gaya tersebut secara terpisah. Kita dapat memplot nilai-nilai dari *V* dan *M* di sepanjang sumbu balok, yang mana dalam hal ini, dua grafik yang dihasilkan disebut *diagram geser dan diagram momen*. Pada Gambar 2.7,


7.500 lb
5.000 lb
7.080 lb
18 ft
20 ft
22 ft
5.420 lb
V = 7.080 lb
M = 0
7.080 lb
V = 7.080 lb
18 ft
M = 127.000 ft-lb
7.500 lb
V = –420 lb
18 ft
M = 127.000 ft-lb
7.500 lb
V = –420 lb
38 ft
M = 119.000 ft-lb
7.500 lb
5.000 lb
V = –5.420 lb
38 ft
M = 119.000 ft-lb
7.500 lb
5.000 lb
V = –5.420 lb
60 ft
M = 0
7.080 lb
V
420 lb
5.420 lb
127.000 ft-lb
119.000 ft-lb
M

GAMBAR 2.7

kita melihat sebuah balok sederhana, dua gaya terpusat yang diterapkan pada balok tersebut, dan reaksi-reaksi tumpuan balok yang dihitung. Balok diperlihatkan terbagi dalam bentuk penampang pada enam tempat, dan reaksi-reaksi internal, V dan M, ditentukan dari persamaan-persamaan kesetimbangan gaya-gaya vertikal dan momen-momen di sekitar penampang yang terpotong.

Pada potongan penampang pertama dalam suatu jarak yang dapat diabaikan dari tumpuan sendi, kita melihat bahwa $M = 0$, dan $V = 7.080$ lb. Pada sebuah penampang di sebelah kiri dari gaya sebesar 7.500 lb, kita tidak menemukan perubahan pada V, tetapi

$$M = 7.080 \times 18 = 127.000 \text{ ft-lb}$$

Di sebelah kanan dari beban seberat 7.500 lb, yang pada dasarnya masih berjarak 18 ft dari tumpuan sendi, M tidak berubah, karena gaya sebesar 7.500 lb tersebut tidak memiliki lengan momen di sekitar titik momen, tetapi geser secara tiba-tiba berubah menjadi

$$V = 7.080 - 7.500 = -420 \text{ lb}$$

Pada penampang dengan jarak 38 ft dari sendi, V masih sebesar – 420 lb, dan

$$M = 7.080 \times 38 - 7.500 \times 20 = 119.000 \text{ ft-lb}$$

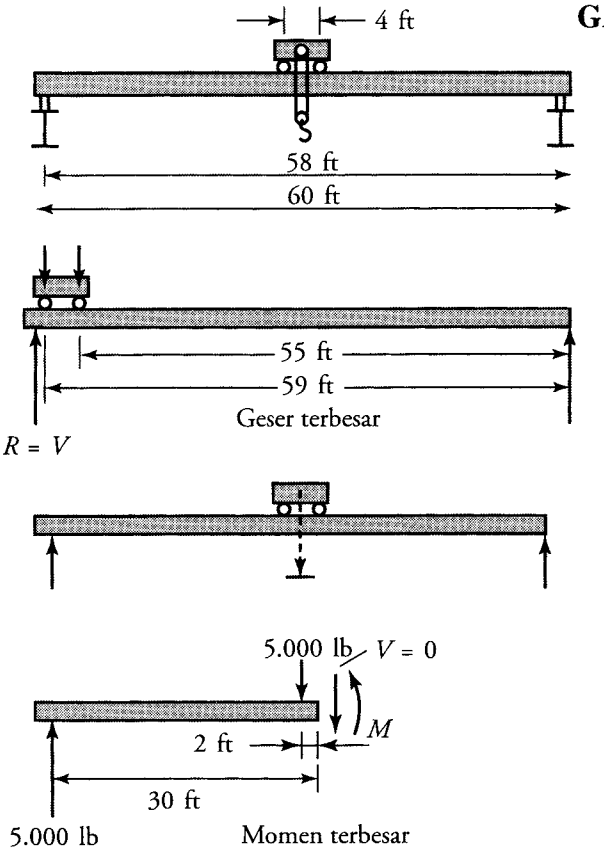
Kedua penampang lainnya diperlihatkan pada gambar dan Anda mungkin ingin membuktikan kebenaran dari nilai-nilai kedua penampang tersebut untuk latihan tambahan. Reaksi-reaksi internal terhitung V dan M diplot dan titik-titik dihubungkan untuk menghasilkan sebuah diagram geser serta diagram momen seperti terlihat pada gambar.

Untuk balok-balok sederhana, biasanya kita melihat bahwa geser terbesar terjadi pada tumpuan-tumpuan, dan momen lentur terbesar terjadi pada tengah bentang. Masih banyak hal yang dapat (dan akan) dibahas lebih lanjut mengenai diagram-diagram V dan M pada bab-bab berikutnya dari buku ini.

2.4 Balok Utama Derek di Atas Kepala

Reaksi-reaksi internal V dan M, tidak hanya bervariasi di sepanjang balok, namun dalam efek-efek dari sebuah beban yang bergerak, reaksi-reaksi tersebut juga akan bervariasi pada sebuah penampang yang sama dari sebuah balok ketika beban tersebut berpindah tempat. Tinjaulah dua balok utama (*girder*) baja bentang sederhana yang berdampingan dengan panjang masing-masing 60 ft. Tiap-tiap balok utama menumpu dua dari empat roda derek yang dapat digerakkan di atas kepala (*overhead*), seperti terlihat pada Gambar 2.8. Tiap-tiap balok utama bekerja sebagai salah satu rel dari roda derek

GAMBAR 2.8



yang dapat bergerak dari kiri ke kanan untuk mengangkat dan memindahkan bagian-bagian serta peralatan-peralatan berat dalam suatu bangunan industri.

Roda-roda di ujung-ujung kedua balok utama rel bertumpu pada balok-balok utama rel longitudinal bentang sederhana sepanjang 100 ft (tumpuan-tumpuan berbentuk I diperlihatkan pada gambar) di kedua ujung balok utama, yang memungkinkan derek digerakkan dari depan bangunan ke belakang bangunan (sebagian diperlihatkan pada gambar). Jadi, sebuah benda dapat diangkat dari satu pojok fasilitas industri, dan diturunkan pada pojok lain yang berlawanan secara diagonal terhadap pojok tersebut.

Kita akan memusatkan perhatian pada sepasang balok utama rel derek bentang 60 ft yang berdampingan. Ketika mendesain tiap-tiap balok utama, penting untuk mengetahui geser balok utama terbesar dan momen lentur terbesar yang dapat ditimbulkan oleh beban derek yang bergerak. Derek memiliki kapasitas angkat sebesar 10 ton (20.000 lb), di mana setengah dari beban yang diangkat masing-masing dipikul oleh satu dari kedua balok utama rel yang paralel tersebut. Derek hanya dapat bergerak pada bagian dalam balok utama sepanjang 58 ft.

Geser terparah akan terjadi apabila derek diletakkan untuk menimbulkan reaksi tumpuan terbesar. Reaksi yang dihasilkan adalah gaya geser pada balok utama. Dari gambar tersebut, kita mendapatkan reaksi R dengan menjumlahkan momen-momen pada ujung sebelah kanan dari balok utama:

$$55(5.000) + 59(5.000) - 60(R) = 0$$

Didapatkan $R = V = 9.500$ lb. Dengan menjumlahkan gaya-gaya vertikal, kita dapat dengan mudah melihat bahwa reaksi tumpuan sebelah kanan hanya sebesar 500 lb.

Momen lentur terbesar terjadi ketika derek terletak kira-kira di tengah bentang balok utama, seperti terlihat pada gambar. Dengan memotong sebuah penampang dari balok di tengah bentang, kita menemukan momen M adalah:

$$M + 2(5.000) - 30(5.000) = 0$$

dan kita menemukan $M = 140.000$ ft-lb.

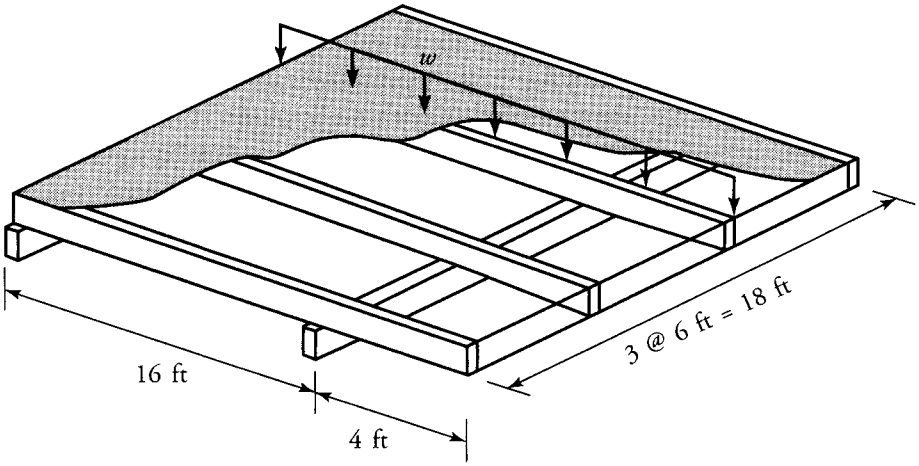
Latihan

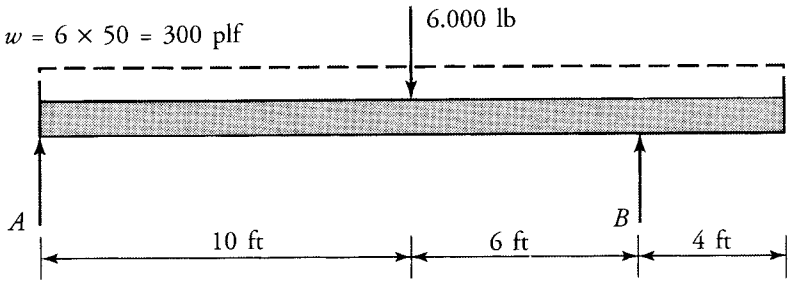
Asumsikan bahwa kedua balok utama rel derek sepanjang 60 ft tersebut berjarak 3 ft dari satu balok utama dengan balok utama lainnya. Untuk balok-balok utama longitudinal dengan bentang 100 ft dan menumpu kedua balok utama rel derek tersebut, berapa momen lentur maksimum dan geser maksimum? ■

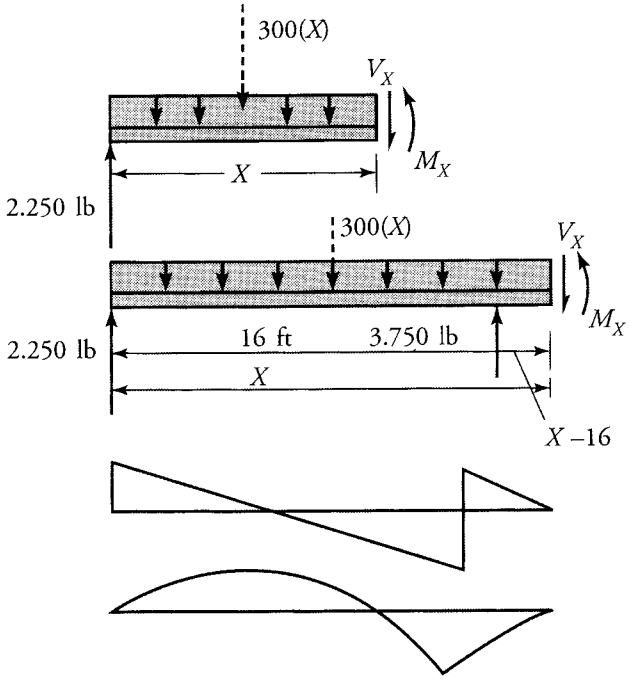
2.5 Balok Dek yang Tergantung

Balok-balok lantai sepanjang 20 ft untuk sebuah dek kayu diperlihatkan pada Gambar 2.9 dengan bentang 16 ft, dan bagian dari balok yang tergantung (*overhang*) sepanjang 4 ft. Kita akan mencoba membuat sebuah diagram geser dan sebuah diagram momen untuk menentukan berapa dan di mana momen maksimum serta geser maksimum yang terjadi. Dek menumpu beban mati ditambah beban hidup secara berurutan sebesar 10 psf dan 40 psf, sehingga beban totalnya adalah 50 psf. Beban mati adalah berat dari papan-papan dek dan keempat balok tumpuan yang diletakkan secara merata di seluruh area lantai. Beban hidup, yang ditetapkan sesuai dengan standar-standar desain bangunan, mewakili sebuah estimasi nominal dari beban maksimum manusia dan perabot yang mungkin ada pada dek dan juga diletakkan secara merata di seluruh area lantai.

Tiap-tiap balok lantai memikul bagian dari bebannya, sehingga beban lantai yang harus ditumpu oleh satu balok ditetapkan sebagai setengah dari







X	V_X	M_X
0	2.250	0
4	1.050	6.600
8	–150	8.400
12	–1.350	5.400
16	–2.550	–2.400

X	V_X	M_X
16	1.200	–2.400
18	600	–650
20	0	0

GAMBAR 2.9

area antara balok tersebut dengan balok-balok di sisi-sisinya. Pada kasus ini, salah satu dari balok interior sepanjang 20 ft memikul beban lantai 6/2 = 3 ft pada kedua sisinya, sehingga balok tersebut menumpu sebuah daerah penyokong sebesar $20 \times (3 + 3) = 120$ ft^2 dari lantai. Pada beban seberat 50 psf, balok menumpu 6.000 lb, yang sama saja dengan sebuah beban merata, $w = 6.000/20 = 300$ plf, seperti yang terlihat pada gambar. Kita bisa saja mendapatkan hasil yang sama dengan menyatakan bahwa setiap ft dari balok sepanjang 30 ft memikul $1 \times (3 + 3) = 6$ ft^2 dari lantai, dan pada beban seberat 50 psf, setiap ft dari balok menumpu beban seberat 300 lb, atau $w = 300$ plf.

Dengan mengetahui beban merata, kita dapat menentukan reaksi-reaksi tumpuan, pertama-tama dengan mengganti beban merata tersebut dengan gaya terpusat setaranya yang bekerja pada pusat gaya beratnya. Gaya sebesar 6.000 lb ini bekerja dalam jarak 10 ft dari ujung manapun dari balok. Kemudian, kita dapat menulis dua persamaan kesetimbangan, pertama-tama dengan menjumlahkan momen-momen pada tumpuan sebelah kanan untuk mendapatkan reaksi pada tumpuan sebelah kiri, lalu kita menjumlahkan gaya-gaya vertikal untuk mendapatkan reaksi pada tumpuan sebelah kanan:

$$6(6.000) - 16(A) = 0: \; A = 2.250 \text{ lb}$$
$$2.250 - 6.000 + B = 0: \; B = 3.750 \text{ lb}$$

Dengan memotong sebuah balok menjadi dua bagian, kita dapat menyelesaikan momen lentur dan geser internal pada penampang manapun di sepanjang bagian struktur. Pada kasus sebuah balok yang dibebani secara merata, kita dapat meninjau sebuah penampang dengan panjang variabel X, seperti yang diperlihatkan pada gambar. Sesuai dengan apa yang telah ditentukan, geser positif bekerja ke arah bawah dan momen positif berotasi berlawanan arah jarum jam pada sebuah penampang bagian kiri balok. Diagram beban dari penampang sebelah kiri yang telah dipisahkan diperlihatkan pada gambar dengan geser, V_X, dan momen, M_X, bekerja dalam arti positif. Subskrip X menunjukkan kedua reaksi internal tersebut bervariasi pada tiap-tiap nilai dari panjang X.

Kita menjumlahkan gaya-gaya vertikal pada penampang ini, dan mendapatkan persamaan berikut untuk geser pada X:

$$V_X = 2.250 - 300(X)$$

Demikian juga, ketika kita menjumlahkan momen-momen pada penampang yang terpotong, di mana gaya, V_X, tidak menimbulkan momen, kita mendapatkan persamaan berikut untuk momen pada X:

$$M_X = 2.250(X) - 300(X)\left(\frac{X}{2}\right) = 2.250(X) - 300\left(\frac{X^2}{2}\right)$$

Kita dapat mensubstitusikan nilai-nilai panjang yang berbeda untuk X ke dalam kedua persamaan tersebut, yang secara efektif memotong balok pada tiap-tiap panjang dan menyelesaikan persamaan-persamaan kesetimbangan untuk geser dan momen pada penampang. V_X dan M_X untuk nilai-nilai X yang berbeda antara tumpuan A dan tumpuan B diperlihatkan pada tabel di sebelah penampang pertama dari balok tersebut.

Untuk bagian balok yang tergantung, penampang kedua harus dipotong di antara tumpuan B dan ujung yang bebas dari balok, seperti yang terlihat pada gambar. Persamaan geser dan persamaan momen untuk segmen balok ini berbeda dibandingkan dengan potongan antara tumpuan A dan tumpuan B, karena reaksi B = 3.750 lb sekarang disertakan pada penampang sebelah kiri. Hasilnya adalah sebuah suku yang ditambahkan ke persamaan-persamaan geser dan momen terdahulu, yaitu

$$V_X = 2.250 - 300(X) + 3.750$$

$$M_X = 2.250(X) - 300(X)\left(\frac{X}{2}\right) + 3.750(X - 16)$$

Nilai-nilai X disubstitusikan ke dalam hubungan-hubungan ini, dan geser-geser serta momen-momen yang dihasilkan pada X diperlihatkan pada tabel di sebelah sketsa penampang kedua.

Sebuah grafik dari semua geser dan semua momen pada nilai-nilai X ini sekarang memberikan kita sebuah gambaran mengenai variasi geser dan variasi momen di sepanjang balok secara keseluruhan. Dapat kita amati bahwa nilai-nilai puncak dari momen lentur terjadi pada tempat geser berubah tanda-tandanya. Kita melihat bahwa pada X = 16 ft, geser mengubah tandanya dan momen memiliki sebuah nilai negatif puncak $M_X = -2.400$ ft-lb. Sebuah momen lentur positif puncak terjadi apabila $V_X = 0$. Kita dapat menggunakan persamaan geser yang terkait dengan penampang balok ini untuk menyelesaikan nilai spesifik X, sebagai berikut:

$$V_X = 0 = 2.250 - 300(X)$$

Kita menemukan bahwa X = 7,5 ft. Kemudian kita mendapatkan nilai momen positif puncak dengan mengganti nilai X ini ke dalam persamaan momen yang tepat, yaitu sebagai berikut:

$$M_X = 2.250(7,5) - 300\left(\frac{7,5^2}{2}\right) = 8.440 \text{ ft-lb}$$

Para pembaca yang sering menggunakan ilmu kalkulus mungkin menyadari bahwa persamaan geser merupakan turunan dari persamaan momen, dan ini berarti bahwa geser dan momen saling-bergantung satu sama lain. Pembuatan plot secara grafik dari geser dan momen dapat disederhanakan dengan memahami hubungan-hubungan matematis antara

geser dan momen, namun metode langsung dengan memotong balok menjadi beberapa penampang biasanya cukup memadai untuk menentukan nilai V dan M kritis. Pada bab-bab berikutnya dari buku ini, kita akan menghadapi persoalan-persoalan yang sebagian besar adalah mengenai balok-balok bentang sederhana, yang geser maksimumnya berada pada tumpuan dan momen maksimumnya berada di tengah bentang.

Latihan

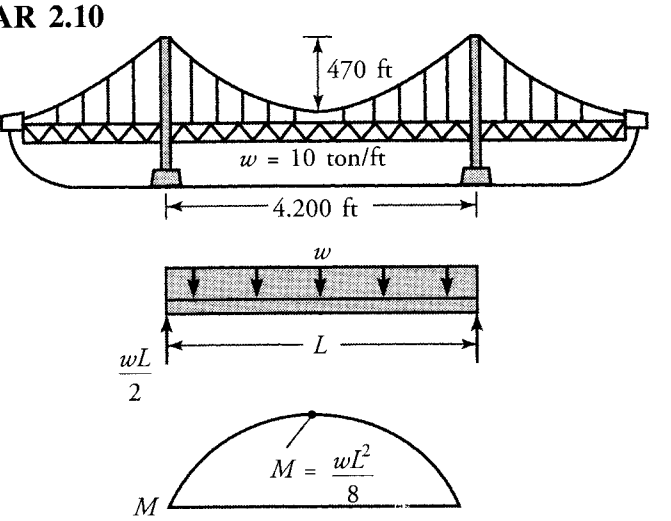
Kerjakan kembali soal ini dengan mengasumsikan bahwa bagian balok yang tergantung (a) memiliki panjang 5 ft, dan (b) tidak ada (0 ft). Buktikan kebenarannya dengan menerapkan metode potongan pada beberapa lokasi tertentu.

Jangan lewatkan yang satu ini! Perlihatkan bahwa untuk sebuah balok bentang sederhana dengan panjang L dan dengan beban merata di sepanjang panjang keseluruhan balok, w, geser maksimum $V = wL/2$ pada tumpuan, dan momen maksimum $M = wL^2/8$ pada tengah bentang. ■

2.6 KABEL

Sebuah cara yang sangat efisien dalam membentangkan jarak dengan beban-beban adalah dengan penggunaan struktur kabel. Sebagai contoh, Gambar 2.10 menggambarkan Jembatan Golden Gate di San Fransisco, di mana dua kabel besar menumpu sebuah jalan raya yang memiliki enam lajur seberat 10 ton per ft di tengah bentang sepanjang 4.200 ft antara dua menara tumpuannya. Kabel-kabel tersebut mengalami pelenturan ke bawah sepanjang 470 ft dari puncak-puncak menara tumpuannya. Berapakah besar tarik di tiap-tiap kabel tersebut? Mungkin kita harus membahas beberapa hal terlebih dahulu sebelum Anda menjawab pertanyaan tersebut.

GAMBAR 2.10

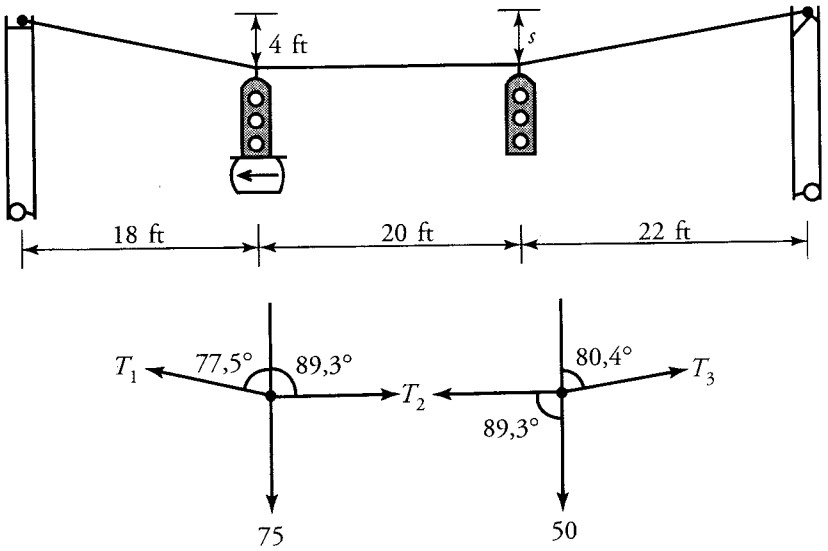


Setiap bagian dari sebuah struktur kabel berada dalam keadaan tarik aksial. Karena sifatnya yang ringan, struktur-struktur tarik ini seringkali terlalu fleksibel untuk memenuhi kebutuhan-kebutuhan struktur, kecuali apabila struktur-struktur tarik tersebut digunakan bersama-sama dengan sebuah sistem struktur pengkaku (seperti rangka batang dek pada kasus Jembatan Golden Gate). Selain itu, karena kabel hanya menumpu tarik, maka kabel tidak dapat digunakan pada kasus-kasus di mana beban-beban yang bekerja dapat berubah dan memerlukan bagian struktur untuk menahan tekan atau lentur.

Untuk panjang kabel dan peletakan dari beban-beban tertentu, sebuah kabel fleksibel sederhana harus mengambil bentuk yang unik agar dapat menumpu beban-beban dalam kesetimbangan. Perubahan yang relatif besar pada beban, dan/atau peletakan, mengakibatkan kabel tersebut berubah menjadi sebuah bentuk yang baru. Dapat terlihat bahwa pelenturan (*sag*) pada titik manapun dari sebuah kabel sederhana yang dibebani adalah sebanding dengan momen lentur internal di sepanjang balok sederhana dengan bentang horisontal yang sama dan peletakan beban yang sama. Dengan analogi ini, kita dapat menentukan geometri dari struktur kabel. Amatilah kesamaan antara pelenturan kabel dari jembatan tersebut dan diagram momen balok sederhana pada Gambar 2.10, serta antara diagram momen pada Gambar 2.7 dan geometri pelenturan dari struktur kabel pada Gambar 2.11.

Gambar 2.11 memperlihatkan sebuah kabel sederhana yang menumpu dua buah lampu lalu lintas dengan berat masing-masing 75 lb dan 50 lb. Kabel itu memiliki bentang horisontal sepanjang 60 ft. Pada struktur kabel, kita harus mengetahui sedikitnya satu jarak pelenturan

GAMBAR 2.11



dari jarak-jarak pelenturan yang ada, dan kita dapat menentukan jarak-jarak pelenturan yang lainnya. Karena kedua beban sebanding dengan beban-beban balok pada Gambar 2.7 dan beban-beban pada kabel memiliki jarak horisontal yang sama seperti halnya pada beban-beban balok, kita dapat menentukan pelenturan yang tak diketahui, yang dilambangkan sebagai s pada gambar:

$$\frac{4 \text{ ft}}{127.000 \text{ ft-lb}} = \frac{s}{119.000 \text{ ft-lb}}$$

Didapatkan bahwa $s = 3{,}74$ ft. Kita sekarang mendapatkan geometri dari kabel dengan menggunakan analogi dari balok.

Seperti yang terlihat pada gambar, masing-masing dari tiga segmen struktur kabel adalah sebuah bagian struktur tarik dua-gaya dengan nilai-nilai T_1, T_2, dan T_3. Dari dimensi-dimensi yang telah diberikan, sudut-sudut kemiringan dari ketiga segmen tersebut adalah

$$z_1 = \arctan\left(\frac{18}{4}\right) = 77{,}5°$$

$$z_2 = \arctan\left(\frac{20}{4 - 3{,}74}\right) = 89{,}3°$$

$$z_3 = \arctan\left(\frac{22}{3{,}74}\right) = 80{,}4°$$

Pada setiap titik penerapan beban, terdapat tiga gaya yang konkuren: beban yang bekerja, beban tarik pada segmen kabel sebelah kiri, dan tarik pada segmen sebelah kanan. Untuk memastikan kesetimbangan dari gaya-gaya yang konkuren, kita menuliskan dua persamaan kesetimbangan gaya, yang memungkinkan kita untuk menyelesaikan tarik kabel di sebelah kiri dan tarik kabel di sebelah kanan. Untuk sistem gaya konkuren yang mencakup lampu lalu lintas seberat 75 lb, persamaan kesetimbangan gaya vertikal dan gaya horisontal masing-masing adalah

$$\cos(77{,}5°) \times T_1 + \cos(89{,}3°) \times T_2 = 75$$
$$\sin(77{,}5°) \times T_1 = \sin(89{,}3°) \times T_2$$

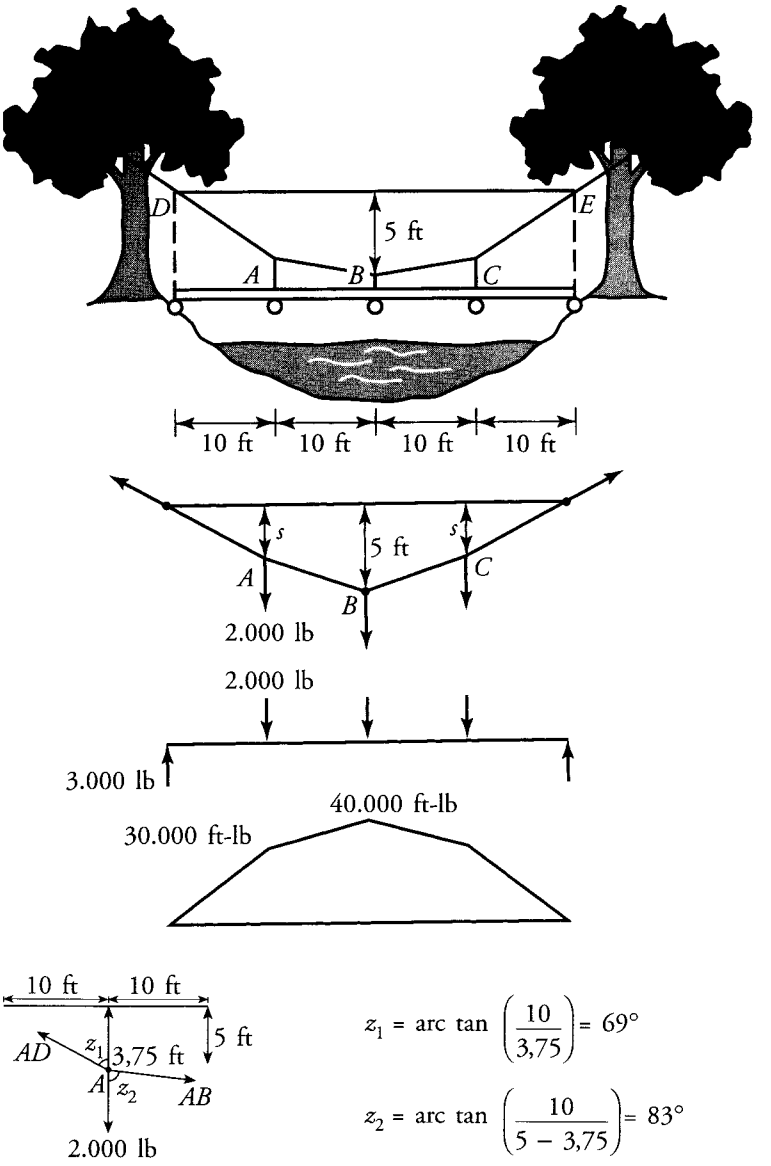
Kita mendapatkan $T_1 = 328$ lb, dan $T_2 = 321$ lb. Untuk kelompok gaya sebesar 50 lb, kita hanya perlu menuliskan satu persamaan saja, karena kita hanya perlu mengetahui T_3 saja. Komponen-komponen horisontal harus sama, sehingga

$$\sin(80{,}4°) \times T_3 = \sin(89{,}3°) \times 321$$

Kita mendapatkan $T_3 = 326$ lb.

2.7 JEMBATAN GANTUNG TALI

Ketika sebuah jembatan runtuh akibat banjir, para sukarelawan dari *U.S Peace Corps* mendirikan jembatan gantung temporer yang memungkinkan para pejalan kaki menyeberangi sebuah jurang selama musim hujan. Gambar 2.12 memperlihatkan jembatan yang terbuat dari sebuah dek kayu dengan lebar 5 ft, dan tergantung pada dua utas tali yang diikatkan pada pohon-pohon besar di ujung-ujung dari jembatan tersebut. Ada cukup tali untuk memungkinkan suatu pelenturan efektif yang diperkirakan sebesar 5 ft pada pertengahan ujung-ujung jembatan, seperti yang terlihat pada gambar. Tali nilon tebal yang digunakan dianggap mampu menerima



$$z_1 = \arctan\left(\frac{10}{3{,}75}\right) = 69°$$

$$z_2 = \arctan\left(\frac{10}{5 - 3{,}75}\right) = 83°$$

GAMBAR 2.12

gaya tarik sebesar 10.000 lb, sebelum putus menjadi dua bagian. Perancang perlu mengetahui *faktor keamanan (safety factor)* yang diterapkan terhadap kegagalan tali.

Perancang memperhitungkan bahwa kayu dek memiliki berat 10 lb/ft^2, yang menghasilkan sebuah beban mati merata seberat 50 lb/ft di sepanjang bentang. Perancang memperkirakan bahwa bisa terjadi 40 orang berada di atas jembatan pada saat yang bersamaan. Dengan perkiraan beban satu orang adalah seberat 150 lb, beban hidup merata seberat 150 lb/ft akan dihasilkan pada bentang sepanjang 40 ft. Dengan beban total diestimasi sebesar 50 + 150 = 200 plf, dan mengasumsikan bahwa tali-tali penggantung (*hanger*) *A*, *B*, dan *C*, masing-masing memikul bagian sepanjang 10 ft dari beban di sepanjang dek, kita melihat bahwa kedua tali bersama-sama memikul tiga beban terpusat yang sama masing-masing sebesar 2.000 lb. Perhatikan bahwa bagian beban dek sepanjang 5 ft pada kedua ujung disalurkan langsung ke tanah.

Untuk mendapatkan tarik terbesar pada tali, yang terjadi pada segmen-segmen ujung, *AD* dan *CE*, kita perlu mengetahui jarak pelenturan *s*, sehingga kita dapat menentukan sudut-sudut dari segmen-segmen tali, *AE* dan *AB*, yang diperlihatkan secara berurutan pada gambar sebagai z_1 dan z_2. Dengan membuat analogi terhadap sebuah balok bentang sederhana sepanjang 40 ft dengan tiga beban masing-masing sebesar 2.000 lb, kita melihat bahwa diagram momen yang terkait adalah seperti diperlihatkan pada gambar. Kesebandingan mendapatkan jarak pelenturan

$$\frac{s}{30.000} = \frac{5}{40.000}$$

Didapatkan s = 3,75 ft dan geometri tali dapat ditentukan.

Sistem gaya yang konkuren pada tali penggantung *A* diperlihatkan dengan gaya-gaya segmen tali yang tak diketahui, *AD* dan *AB*, serta sudut-sudut $z_1 = 69°$ dan $z_2 = 83°$ dihitung dari geometri yang diketahui. Kita menulis persamaan kesetimbangan gaya vertikal dan gaya horisontal secara berurutan, untuk titik *A*, sebagai berikut.

$$AD \times \cos(69°) - 2.000 - AB \times \cos(83°) = 0$$
$$AD \times \sin(69°) - AB \times \sin(83°) = 0$$

Jawaban persamaan tersebut memberikan kita tarik maksimum pada tali ini, *AD* = 8.200 lb. Karena kita mencari beban jembatan total, gaya ini adalah gaya yang dipikul oleh kedua tali, sehingga tiap-tiap tali hanya memikul 8.200/2 = 4.100 lb. Faktor keamanan terhadap kegagalan tali menjadi

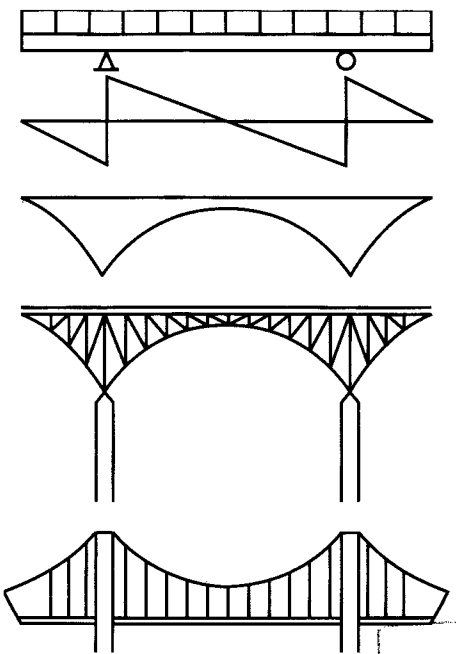
$$\text{Faktor Keamanan} = \frac{10.000}{4.100} = 2,4$$

Latihan Berapakah besar faktor keamanan terhadap kegagalan tali apabila pelenturan di tengah jembatan adalah 12 ft, dan bukan 5 ft? Beranikah Anda berjalan menyeberangi jembatan ini? ■

2.8 LENGKUNGAN (ARCHES)

Sebuah pengamatan yang sangat menarik dan sesuai mengenai struktur kabel, adalah bahwa apabila struktur tersebut dibalikkan letaknya, struktur tersebut akan membentuk lengkungan ideal, yang memiliki beban-beban yang serupa dan peletakan-peletakan beban yang serupa di sepanjang bentang horisontal yang sama. Struktur lengkungan yang ideal ini harus ditumpu-sendi pada kedua ujungnya seperti pada sebuah balok sederhana yang sesuai, dan dikenal sebagai lengkungan dua-engsel (*two-hinged arch*). Untuk sebuah lengkungan yang berbentuk ideal, setiap segmen dari lengkungan berada dalam tekan murni, yang merupakan kebalikan dari struktur kabel di mana setiap segmen berada dalam tarik murni.

Jadi, terdapat kesamaan yang elegan antara bentuk terbalik dari kabel pada sebuah jembatan gantung dengan bentuk dari jembatan lengkungan, dan baik bentuk kabel maupun bentuk lengkungan dapat dianalogikan terhadap diagram momen dari sebuah balok dengan beban dan bentang yang serupa, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.13. Analisis dari sebuah lengkungan yang ideal sama seperti untuk struktur kabel. Analogi



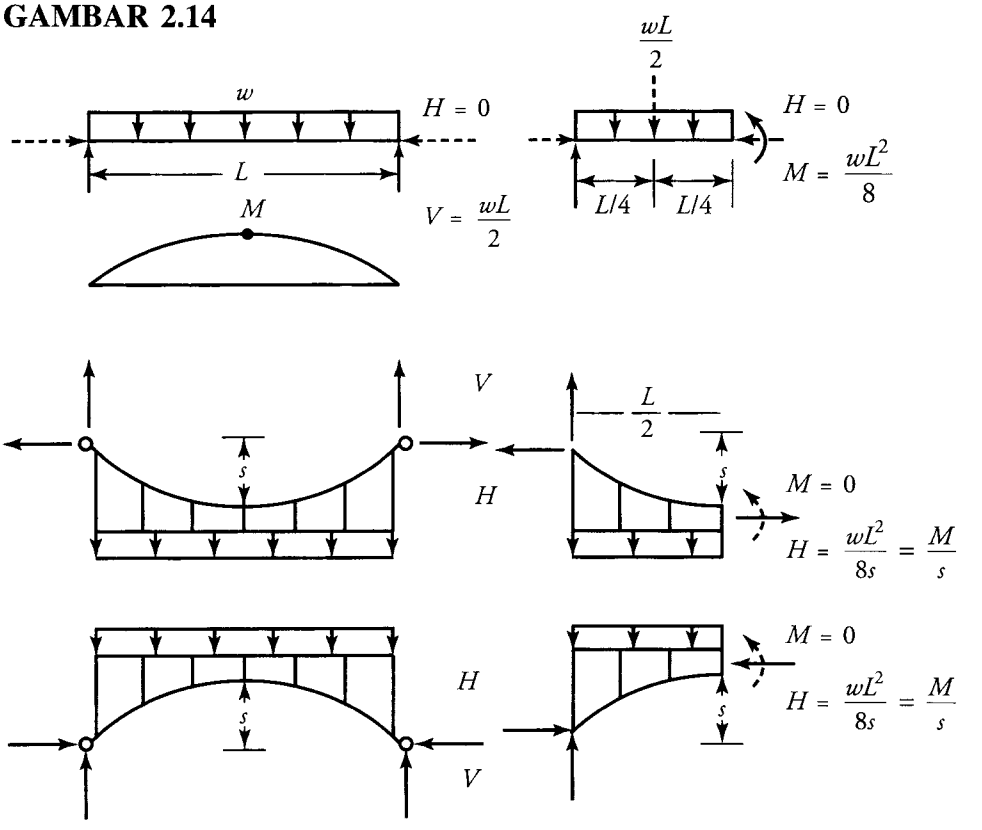
GAMBAR 2.13

MILIK
PERPUSTAKAAN
TIMUR

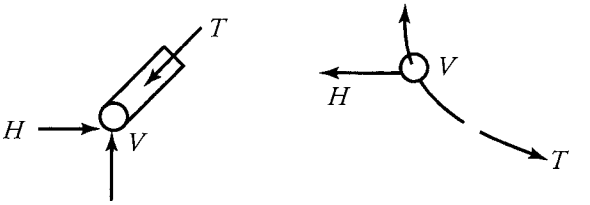
dari suatu balok terhadap lengkungan dan kabel menjelaskan pada kita bahwa bentuk dari elemen-elemen struktur tersebut dapat menyesuaikan dengan diagram momen dari sebuah balok yang dibebani secara serupa.

Pada Gambar 2.14, kita melihat sebuah balok, sebuah kabel, dan sebuah lengkungan beserta diagram benda-bebas dari penampang setengah bentang dari ketiga elemen struktur tersebut. Kita menentukan s sebagai pelenturan maksimum dari sebuah kabel yang dibebani merata, atau tinggi puncak

GAMBAR 2.14



Tarik maksimum atau total gaya maksimum, T, pada tumpuan-tumpuan



$$T = \sqrt{\left(\frac{wL}{2}\right)^2 + \left(\frac{wL^2}{8s}\right)^2}$$

dari sebuah lengkungan yang dibebani secara uniform atau merata. Untuk ketiga elemen struktur tersebut, komponen-komponen reaksi vertikalnya adalah $V = wL/2$.

Tidak seperti halnya untuk balok, lengkungan dan kabel harus memiliki komponen-komponen reaksi horisontal untuk mempertahankan kesetimbangan. Kesetimbangan penampang-penampang setengah bentang dari bagian struktur menunjukkan bahwa komponen-komponen reaksi horisontal harus konstan di sepanjang bagian struktur. Kita melihat bahwa untuk sebuah balok sederhana, $H = 0$, dan momen maksimum $M = wL^2/8$. Untuk kabel dan lengkungan yang ideal, $M = 0$ dan $H = wL^2/(8s)$, yang merupakan rasio dari momen balok sederhana terhadap pelenturan atau tinggi puncak, s. Untuk kabel, gaya ini adalah komponen horisontal dari tarik pada kabel di titik manapun, dan gaya ini merupakan komponen horisontal dari tekan atau total gaya (*thrust*) pada setiap titik dari lengkungan yang ideal. Rumus $H = wL^2/8s$, dapat digunakan untuk memperkirakan total gaya horisontal dari tiga lengkungan yang diengsel, seperti yang akan kita lihat pada struktur rangka.

Sebagai penutup bahasan kita mengenai lengkungan, telah dinyatakan bahwa apabila beban-beban pada kabel berubah, maka bentuk kabel harus juga berubah. Namun demikian, apabila beban-beban pada lengkungan berubah, bentuk lengkungan tidak akan dapat berubah. Ini terjadi karena untuk mencegah terjadinya tekuk, bagian-anggota struktural tekan harus kaku dan kekar dengan penampang-penampang substansial yang menahan terjadinya perubahan-perubahan bentuk. Apabila beban-beban lengkungan ideal berubah, maka lengkungan itu selain tidak lagi berada dalam tekan aksial murni, tetapi juga mengalami geser internal dan reaksi-reaksi lentur. Pada kasus seperti ini, lengkungan dianalisis sebagai sebuah struktur rangka.

Apakah Anda masih ingat dengan pertanyaan mengenai tarik maksimum pada kabel-kabel dari Jembatan Golden Gate, pada permulaan dari Subbab 2.6? Dari gambar didapatkan

$$T = \sqrt{\left(\frac{wL}{2}\right)^2 + \left(\frac{wL^2}{8s}\right)^2}$$

Untuk tarik maksimum pada salah satu dari kabel di tengah bentang, yang memikul setengah dari beban merata seberat 10 ton/ft di sepanjang bentang 4.200 ft dengan sebuah pelenturan sebesar 470 ft, kita mendapatkan

$$T = \sqrt{\left(\frac{15 \times 4.200}{2}\right)^2 + \left(5 \times \frac{4.200^2}{8 \times 470}\right)^2} = 25.700 \text{ ton}$$

2.9 KOLOM

Sebelum kita meninggalkan bab mengenai bagian struktur ini, mungkin sebagian pembaca tertarik untuk memperhatikan jenis bagian struktur lainnya yang dapat dipelajari dengan menggunakan analisis untuk balok—yaitu kolom. Perlu diingat bahwa sebuah kolom merupakan bagian struktur dua-gaya dalam tekan yang harus kuat (dan kaku), kalau tidak, kolom tersebut akan mengalami tekuk apabila dibebani oleh gaya tekan yang besar.

Pada Gambar 2.14, kita melihat bagaimana rasio momen balok sederhana terhadap tinggi puncak lengkungan/pelenturan kabel, M/s, digunakan untuk menentukan gaya-gaya, H, yang bekerja di sepanjang sumbu antara tumpuan-tumpuan dari bagian struktur lengkungan dan struktur kabel. Akan kita lihat nanti dalam buku ini bahwa untuk panjang L dari sebuah balok, dan kekakuan balok, EI, rasio dari momen balok sederhana, M, terhadap defleksi yang terkait, D, (defleksi adalah jumlah yang kecil dari pelenturan yang terjadi akibat beban transversal), adalah sebuah konstanta yang diberikan oleh

$$\frac{M}{D} = \frac{10EI}{L^2}$$

Kita nantinya juga akan menemukan bahwa beban tekuk kritis, yang merupakan gaya aksial terbesar yang dapat ditumpu oleh sebuah kolom yang lurus tanpa mengalami kegagalan akibat tekuk, adalah $F_{CR} = 10\ EI/L^2$, yang sama dengan rasio M/D dari sebuah balok. Jadi, semua elemen struktur yang umum, balok, kabel, lengkungan, dan kolom, dapat dipelajari dengan cara-cara analisis untuk balok. Jangan terkejut apabila ada perbedaan pada susunan-susunan struktur secara keseluruhan.

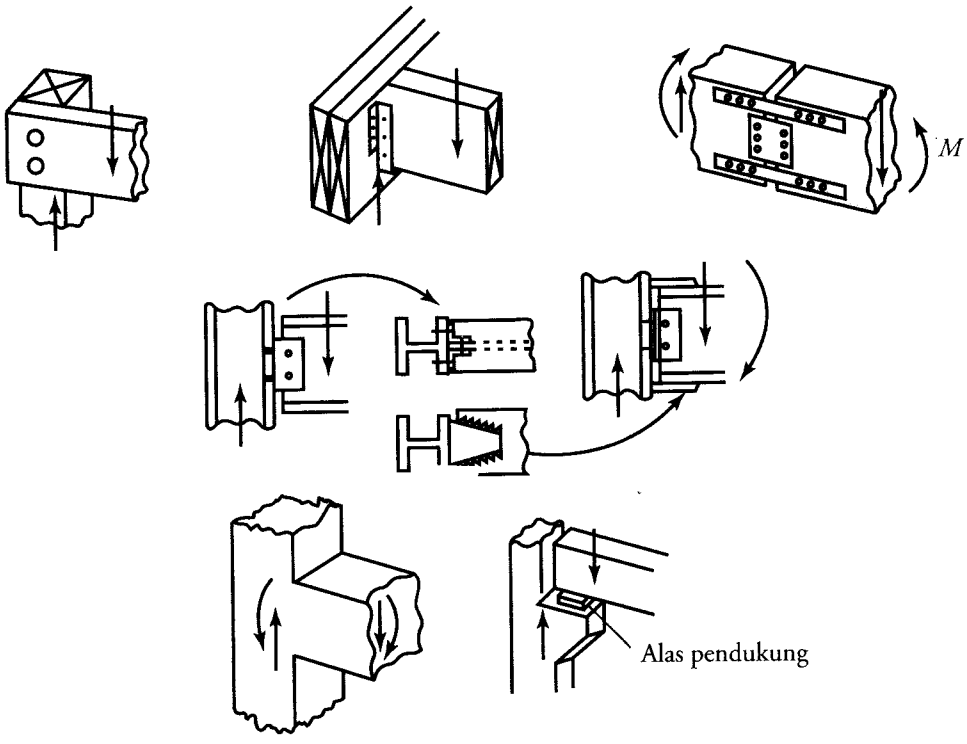
2.10 SAMBUNGAN-SAMBUNGAN

Agar sebuah sistem struktur dapat berfungsi, jalur-jalur beban (*load paths*)—yang akan kita bahas pada bab berikutnya—harus dihasilkan di seluruh elemen-elemen struktur melalui sambungan-sambungan yang dapat mentransfer beban-beban dari satu elemen struktur ke elemen struktur yang lainnya. Dalam pembahasan terdahulu mengenai jenis-jenis tumpuan balok, telah digambarkan tiga jenis utama dari sambungan-sambungan tumpuan— tumpuan rol, tumpuan sendi, dan tumpuan jepit—dan kita mencatat bahwa jenis dan lokasi dari tumpuan menentukan klasifikasi dari balok-balok sederhana, balok kantilever, balok menerus, dan lain sebagainya. Hal yang sama dapat juga dinyatakan untuk sistem-sistem struktur yang lebih kompleks. Lebih lanjut, kita

mengklasifikasikan dan memperagakan perilaku struktur berdasarkan sambungan-sambungan yang digunakan dan apakah susunan struktur tersebut tersambung untuk memungkinkan pemuaian akibat perubahan suhu di antara elemen-elemen strukturnya, untuk hanya mentransfer gaya-gaya di antara bagian struktur, dan/atau untuk memungkinkan transfer, baik gaya-gaya maupun momen-momen lentur.

Terdapat banyak sekali cara untuk membuat sambungan di antara elemen-elemen struktur, sama banyaknya dengan jumlah orang yang memikirkan detail-detailnya. Beberapa ilustrasi dari sambungan-sambungan tipikal ditunjukkan pada Gambar 2.15. Sambungan rol, yang umumnya hanya digunakan pada tumpuan-tumpuan struktur, hanya menghasilkan kekangan terhadap gerakan dalam suatu arah tunggal, biasanya tegak lurus terhadap bagian struktur yang ditumpu oleh rol tersebut. Sebuah alas pendukung (*bearing pad*) yang digunakan di antara sebuah balok dan tumpuannya, yang digunakan terutama untuk balok-balok utama jembatan, merupakan bentuk yang umum dari tumpuan rol. Alas yang bersifat seperti karet ini mencegah pergerakan vertikal dari ujung balok lintang, namun hanya memberikan sedikit ketahanan terhadap gerakan balok utama horisontal sehingga memungkinkan pemuaian dan penyusutan akibat perubahan suhu.

GAMBAR 2.15



Sambungan sendi, yang juga disebut sambungan engsel atau sambungan sederhana, mencegah bagian struktur yang tersambung dari gerakan horisontal relatif atau gerakan vertikal relatif, sehingga terdapat dua komponen gaya yang mengekang yang tak diketahui. Sebuah sambungan sendi dapat dikenali dengan mudah karena kurangnya kekangan rotasional yang dihasilkannya. Bagian struktur yang tersambung oleh sendi-sendi dapat bebas berotasi secara relatif satu dengan yang lainnya, sehingga tidak ada momen yang ditransfer melalui sambungan, dan hanya sebuah gaya yang dihasilkan oleh komponen horisontal serta komponen vertikalnya. Sambungan-sambungan sendi secara tipikal difabrikasi dengan paku-paku atau baut-baut. Walaupun satu kelompok baut baja yang besar digunakan untuk membentuk sebuah titik tumpul yang terlihat kaku, namun peletakan baut dan fakta bahwa lubang-lubang baut sedikit lebih besar daripada baut-bautnya menghasilkan suatu kelonggaran yang cukup pada titik tumpul untuk mencegah terjadinya transfer momen di antara elemen-elemen struktur yang tersambung.

Sambungan jepit, atau sambungan kaku, diasumsikan sebagai sebuah penyatuan menyeluruh dari elemen-elemen struktur yang tersambung. Bagian struktur yang tersambung secara menyeluruh terkunci secara bersama-sama, dan tidak ada gerakan relatif yang akan terjadi—tidak terdapat gerakan horisontal relatif, tidak ada gerakan vertikal relatif, dan tidak ada rotasi relatif. Jadi terdapat tiga reaksi tak diketahui di antara dua bagian struktur apapun yang disatukan: sebuah komponen gaya horisontal, sebuah komponen gaya vertikal, dan sebuah kopel momen.

Pada jenis struktur apapun, jenis material bagian struktur—kayu, baja, dan/atau beton—memainkan peranan yang menentukan dalam penggunaan jenis sambungan. Struktur-struktur kayu sebagian besar menggunakan sambungan-sambungan sendi; struktur beton bertulang yang dicor di tempat cenderung menggunakan sambungan-sambungan jepit secara keseluruhan, sedangkan struktur beton pracetak dan struktur baja menggunakan sambungan-sambungan yang secara merata terbagi antara sambungan-sambungan sendi sederhana atau jenis-jenis sambungan-sambungan kaku yang dapat menahan momen. Sambungan kaku jarang digunakan untuk konstruksi kayu, dan biasanya memerlukan penggunaan plat-plat baja. Sambungan-sambungan baja yang kaku dapat terlihat licin atau besar, tergantung pada jumlah baut, atau lebih tepatnya, jumlah garis pengelasan, yang merupakan jenis penyambung yang dominan. Sambungan kaku pada beton bertulang umum digunakan dan merupakan hal yang lazim untuk bahan konstruksi ini. Penulangan baja diletakkan pada papan rangka kerja cetakan, kemudian beton dituangkan untuk membentuk sebuah sambungan struktur monolit antara bagian struktur yang sangat kaku. Baja memikul semua tarik, sedangkan beton menahan semua tekan yang terjadi pada titik tumpul .

Secara umum, ketika beban-beban disalurkan dari balok-balok horisontal ke kolom-kolom vertikal dari struktur, penggunaan sambungan-

sambungan kaku (dan bukan sambungan-sambungan sederhana) akan menghasilkan penghematan bahan seperti balok-balok yang lebih kecil, dan kolom-kolom yang sedikit lebih besar diperlukan. Kerugiannya adalah waktu konstruksi yang lebih lama dan biaya yang lebih besar untuk membuat sambungan-sambungan kaku. Kondisi-kondisi tanah memainkan peranan penting dalam penentuan sistem yang tepat, seperti yang akan kita lihat belakangan dalam buku ini.

Analisis mengenai sambungan-sambungan struktur sangatlah kompleks. Kita nantinya dalam buku ini akan menyelidiki gaya-gaya (dan tegangan-tegangan) yang terkait dengan baut-baut dan pengelasan. Walaupun detail-detail sambungan standar telah tersedia, namun desain-desain struktur yang unik seringkali menuntut sambungan-sambungan khusus yang membutuhkan usaha-usaha analisis yang sungguh-sungguh. Perhatian yang kurang memadai pada detail-detail sambungan seringkali mengakibatkan kegagalan-kegagalan struktur yang sangat disayangkan dan seharusnya tidak perlu terjadi. Sangatlah penting bagi seluruh profesional yang terlibat—arsitek perancang, insinyur sipil, pabrik pembuat komponen struktur, manajer proyek konstruksi, dan pengawas bangunan—untuk membuat suatu kesepakatan mengenai siapa yang bertanggung jawab atas detail-detail sambungan dan untuk menyetujui perubahan desain struktur apapun yang bisa jadi di persyaratkan.

3 SUSUNAN-SUSUNAN STRUKTUR

3.1 BEBAN-BEBAN DESAIN

Secara singkat, kita telah membahas beban-beban struktur, dan daerah pembebanan pada bab-bab terdahulu. Sekarang, secara rinci kita akan mempelajari bagaimana susunan-susunan struktur menahan beban-beban yang bekerja padanya. Kita telah melihat bahwa beban-beban struktur secara umum dapat dikelompokkan menjadi beban hidup vertikal dan beban mati vertikal akibat gaya-gaya gravitasi beserta gaya-gaya angin lateral dan gaya-gaya yang ditimbulkan oleh gempa bumi.

Kita memulai pembahasan kita dengan beban-beban struktur yang dapat ditentukan secara akurat, yaitu beban-beban mati, yang merupakan berat struktur yang tersusun dari bahan-bahan struktur. Kita dapat secara akurat menentukan beban mati yang ditumpu oleh komponen apapun dari struktur, baik untuk sebuah desain struktur yang baru maupun dari analisis terhadap sebuah struktur yang telah ada. Ini hanya memerlukan pengetahuan mengenai berat satuan bahan dan jumlah bahan yang digunakan.

Misalkan sebuah balok baja dengan bentang 30 ft menahan lantai beton dengan ketebalan 6 in., seluas 500 ft^2. Dapat kita tentukan bahwa setiap ft^2 dari lantai memiliki volume beton sebesar 1 ft × 1 ft × $\frac{6}{12}$ ft = $\frac{1}{2}$ ft^3. Karena berat satuan beton adalah 150 lb/ft^3, kita memperkirakan bahwa balok lantai baja tersebut menahan beban mati lantai seberat:

$$W = 150 \text{ lb/ft}^3 \times \frac{1}{2} \text{ ft}^3/\text{ft}^2 \times 500 \text{ ft}^2 = 37.500 \text{ lb}$$

Apabila beban ini tersebar secara merata sepanjang balok, maka beban tersebut akan menghasilkan beban linear, w:

$$w = 37.500 \text{ lb} \div 30 \text{ ft} = 1.250 \text{ lb/ft (plf)}$$

Selain berat lantai, balok baja tersebut harus menahan bebannya sendiri. Misalkan balok memiliki penampang seluas 20 in^2. Satu ft linear dari balok ini memiliki volume, V:

$$V = \frac{1 \text{ ft} \times 20 \text{ in}^2}{(12 \text{ in/ft})^2} = 0{,}14 \text{ ft}^3$$

Karena berat satuan baja adalah 500 lb/ft^3, berat balok baja linear adalah w:

$$w = 500 \text{ lb/ft}^3 \times 0{,}14 \text{ ft}^3 = 70 \text{ plf}$$

Berat total dari balok sepanjang 30 ft menjadi 30 ft × 70 plf = 2.100 lb.

Kita bisa saja selalu menghitung beban mati struktur sebagai hasil kali dari berat satuan bahan dengan jumlah satuan bahan yang ditumpu. seperti yang baru saja kita lihat di atas. Namun demikian, elemen-elemen struktur umum bangunan dari lantai, atap, dan dinding tersusun dari beberapa jenis bahan, seperti eternit interior di atas dinding penopang kayu, beton di atas lantai dek baja, lapisan aspal pada dek kayu lapis di atas kaso kayu dengan penyekat fiberglass, dan lain sebagainya. Untuk kasus-kasus tersebut, lebih tepat untuk menyatakan berat mati per ft^2 dari berbagai jenis elemen struktur bangunan.

Sebagai contoh, atap dan lantai kayu khusus untuk kawasan pemukiman memiliki berat mati sebesar 10 psf, dan dinding memiliki berat mati sekitar 5 psf. Berat dari sistem atap dan lantai baja yang umum digunakan untuk struktur bangunan perniagaan cukup bervariasi. dengan nilai-nilai tipikal berkisar dari 30 psf hingga 50 psf. Untuk struktur beton, suatu prosedur perkalian dari berat satuan bahan dengan volume struktur biasanya digunakan untuk menghitung beban-beban mati dari semua elemen struktur.

Beban hidup vertikal adalah total berat segala elemen yang bukan merupakan bagian yang terpasang secara tetap pada struktur. Contoh dari beban hidup vertikal ini antara lain adalah manusia, perabot, *forklift*. truk, air hujan, salju, dan peralatan-peralatan yang dapat dipindah-pindahkan. Karena adanya ketidakpastian dari beban hidup pada sebuah bangunan atau jembatan dalam suatu jangka waktu tertentu, adalah penting untuk mendesain struktur terhadap tingkatan-tingkatan beban hidup—disebut *beban-beban hidup desain*—yang diperkirakan akan menyamai tingkatan dari pembebanan terparah yang mungkin dapat terjadi. Jadi, kita tidak akan mendesain lantai ruang tamu dari sebuah rumah tinggal dengan jumlah perkiraan orang yang sama seperti ketika kita mendesain koridor untuk rute tangga darurat dari sebuah gedung perkantoran yang besar. Demikian juga, kita tidak akan mendesain setiap lajur jalan raya pada sebuah jembatan untuk sebuah antrean yang padat dari truk-truk kontainer yang ada.

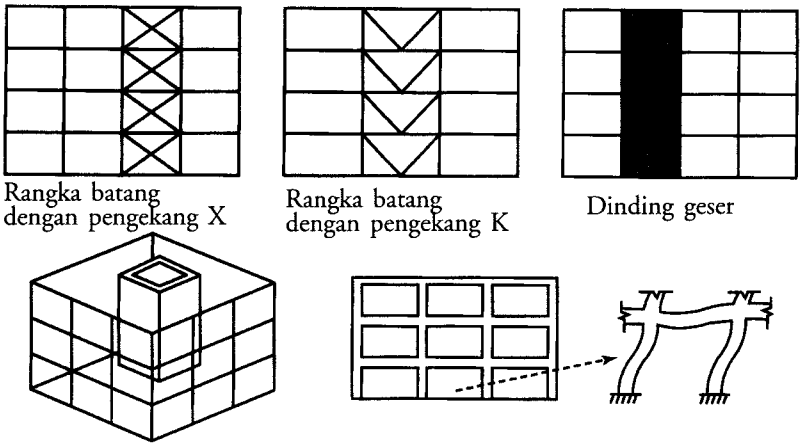
Para perancang struktur biasanya mengacu pada standar-standar perancangan bangunan, yang menetapkan tingkatan beban hidup desain

yang layak berdasarkan kapasitas beban tipikal yang dimungkinkan oleh struktur-struktur, setelah melalui jangka waktu tertentu. Misalkan analisis struktur dari beberapa gedung parkir yang sudah tua menunjukkan bahwa struktur-struktur yang telah melakukan tugasnya dengan baik tersebut dapat menahan beban hidup lantai yang sama sebesar 100 psf, tanpa menimbulkan tegangan yang berlebihan atau deformasi yang berlebihan pada bahan bangunan. Apabila para peneliti struktur melakukan pengujian beban terhadap kegagalan pada struktur-struktur tersebut, dan hasilnya menunjukkan bahwa struktur-struktur itu memiliki faktor keamanan terhadap kegagalan, maka beban sebesar 100 psf akan ditetapkan menjadi beban hidup desain nominal dari gedung-gedung parkir yang realistis dan terbukti kebenarannya.

Demikian juga, apabila perhitungan untuk bentang dan jarak tipikal dari gelagar lantai rumah tinggal yang telah digunakan selama kira-kira 100 tahun menunjukkan bahwa lantai dari rumah tinggal tersebut dapat menahan beban hidup lantai merata sebesar 40 psf, tanpa menimbulkan pergerakan berlebihan atau tegangan berlebihan dari bagian struktur kayunya, maka standar perancangan bangunan harus mengacu pada hasil analisis perhitungan tersebut untuk menetapkan beban hidup desain. Jadi, selama ini pengalaman telah dijadikan acuan untuk praktek konstruksi pada berbagai jenis struktur bangunan dan jembatan, beserta kapasitas beban aman yang telah menjadi bagian yang tak terpisahkan dari struktur tersebut. Hal itu telah dikembangkan dalam ketentuan-ketentuan standar perancangan bangunan untuk beban-beban hidup.

Kita tidak mungkin mendesain beban-beban hidup yang ada pada sebuah struktur secara pasti. Kita tidak dapat mengetahui secara pasti jumlah salju yang akan jatuh pada atap sebuah bangunan, atau di mana lokasi orang dan perabot pada sebuah daerah lantai, atau berapa beban as roda atau mobil pada sebuah jembatan secara pasti. Oleh karena itu, beban hidup desain biasanya merupakan nilai nominal yang dirumuskan sebagai beban tersebar per ft^2, atau beban per ft linear. Beban nominal tersebut menyerupai pengaruh dari beban hidup aktual yang kemungkinan besar dapat diantisipasi oleh struktur. Beban hidup desain nominal yang dinyatakan dalam standar perancangan bangunan, dan digunakan dalam contoh soal buku ini, menunjukkan bahwa intensitas dari beban hidup desain nominal bervariasi, tergantung pada banyak hal seperti iklim pada lokasi struktur, jenis dan fungsi bangunan, serta panjang bentang dan lokasi sebuah jembatan.

Selain beban-beban gravitasi vertikal, struktur-struktur juga harus menahan pengaruh alam seperti angin dan gempa bumi yang menimbulkan gaya-gaya lateral. Struktur-struktur harus dikekang terhadap gaya-gaya lateral tersebut. Seperti yang akan kita lihat nanti pada contoh



GAMBAR 3.1

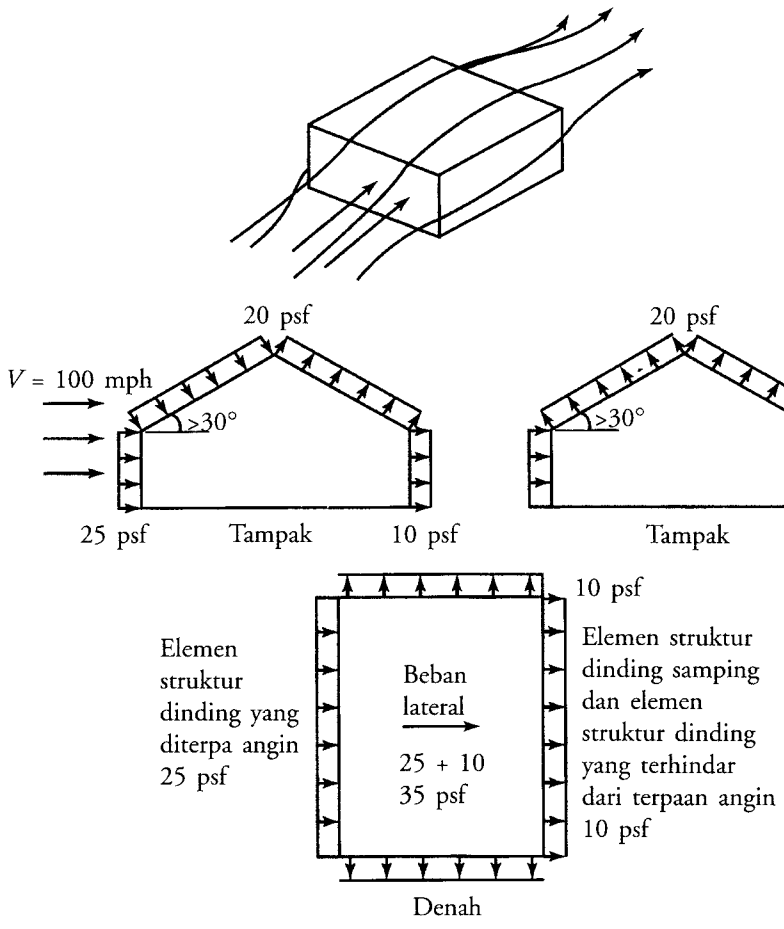
desain, dan seperti yang dicontohkan pada Gambar 3.1, dinding geser, bagian inti untuk lift, rangka batang vertikal yang terbentuk oleh pengekang X atau K, atau rangka penahan momen merupakan sistem yang umum digunakan untuk mengekang berbagai jenis struktur terhadap keruntuhan lateral.

Gaya angin dan gempa bumi sangatlah bervariasi, dan cara bekerjanya pada struktur sangatlah kompleks, sehingga kita harus menerapkan model yang disederhanakan untuk mengetahui bagaimana gaya-gaya alam ini mempengaruhi struktur. Sebagai contoh, apabila sebuah struktur berada dalam sebuah jalur aliran udara (angin) berkecepatan tinggi, udara tersebut harus mengalir ke sekitar penghalang (struktur) dengan efek yang menimbulkan tekanan-tekanan ke arah dalam dan ke arah luar struktur. Gaya-gaya yang bekerja pada struktur akibat angin dihitung sebagai tekanan desain nominal dikalikan dengan luas permukaan di mana tekanan-tekanan tersebut terjadi. Tekanan langsung pada sebuah dinding yang diterpa angin adalah

$$q = 0{,}003(V)^2$$

dengan q dalam lb/ft^2, dan V adalah kecepatan angin dalam mil per jam.

Gambar 3.2 memperlihatkan tekanan-tekanan desain yang memperagakan pengaruh angin dengan kecepatan 100 mil per jam yang bekerja pada struktur-struktur dengan konfigurasi-konfigurasi geometris yang berbeda-beda. Perhatikan pada gambar bahwa mayoritas dari struktur-struktur tersebut mengalami tekanan-tekanan hisap ke arah luar. Dalam kasus atap-atap datar relatif, tekanan-tekanan hisap dapat menimbulkan gaya-gaya yang dapat lebih besar dibanding beban atap dan benar-benar dapat mengangkat atap tersebut dari bangunan. Beban lateral yang harus



GAMBAR 3.2

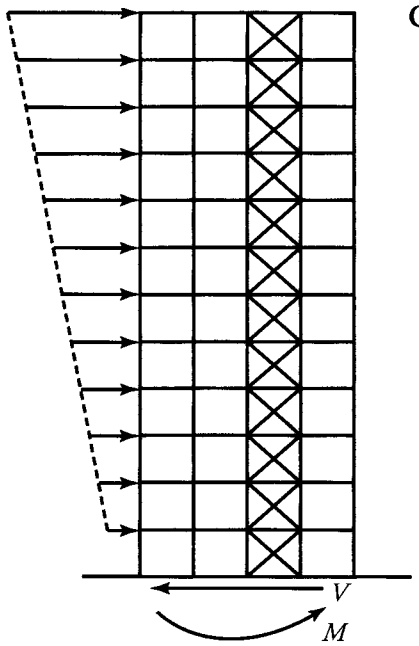
ditahan oleh sistem struktur adalah penjumlahan dari gaya-gaya lateral yang dihasilkan pada dinding yang diterpa oleh angin dan dinding yang terhindar dari terpaan angin. Elemen struktur atap dan dinding seperti kaca-kaca jendela, sambungan-sambungan dinding tirai (*curtain wall*), dan sambungan-sambungan batang ikat (*tie-down*) atap, semuanya harus didesain untuk mampu mengatasi pengaruh tekanan ke dalam dan ke luar struktur.

Gempa bumi menimbulkan pengaruh beban variabel yang ekstrim pada struktur, tergantung pada beberapa faktor seperti kondisi pondasi, tinggi struktur, sistem struktur (dinding geser, rangka batang, atau rangka penahan momen), kepadatan massa dari bahan struktur (kayu, baja, atau beton), dan jarak struktur dari pusat gempa bumi. Gerakan dari goyangan tanah lateral yang cepat akibat gempa bumi, dengan cepat memaksa massa yang besar dari struktur apapun untuk memulai sebuah goyangan

dari sisi-ke-sisi yang umumnya bertambah seiring durasi gempa bumi, yang dapat terjadi selama kira-kira satu menit. Benda masif apapun yang secara cepat bergerak dari satu sisi ke sisi yang lainnya dalam prosesnya harus mengalami percepatan dan perlambatan dalam waktu yang cepat.

Dari ilmu fisika, kita mengetahui bahwa hukum kedua Newton mengenai gerakan menyatakan bahwa sebuah massa yang mempercepat kecepatannya sama dengan sebuah gaya—pada kasus yang kita tinjau ini, gaya adalah beban gempa bumi lateral pada struktur. Gaya-gaya lateral pada sebuah struktur yang diakibatkan gempa bumi dirumuskan sebagai sebuah fraksi dari berat struktur vertikal, dan fraksi ini dapat bernilai $\frac{1}{2}$ sampai 1 untuk situasi-situasi gempa bumi yang terparah. Jadi, sebuah struktur dapat mengalami sebuah fraksi yang besar, sebesar berat struktur itu sendiri sebagai sebuah beban lateral!

Untuk tujuan analisis dan desain, besar dan sebaran beban gempa bumi lateral serupa dengan beban lateral yang terjadi akibat angin topan, sehingga sistem pengekang lateral yang serupa diperlukan untuk kedua kasus ini. Semakin tinggi sebuah bangunan, semakin besarlah gaya lateralnya, dan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.3, gaya lateral ini biasanya diasumsikan bekerja pada tiap-tiap tingkat lantai dan tingkat atap. Untuk beban angin, gaya total pada tiap-tiap tingkat lantai adalah jumlah dari tekanan-tekanan angin atas desain bangunan yang diterpa angin ditambah dengan yang terhindar dari terpaan angin, dikalikan dengan daerah pembebanan yang terproyeksi dari tiap-tiap lantai. Untuk



GAMBAR 3.3

gaya gempa, beban merupakan hasil dari percepatan gempa rencana pada tiap-tiap tingkat, dikalikan dengan massa lantai atau atap dan dinding pada tingkat tersebut.

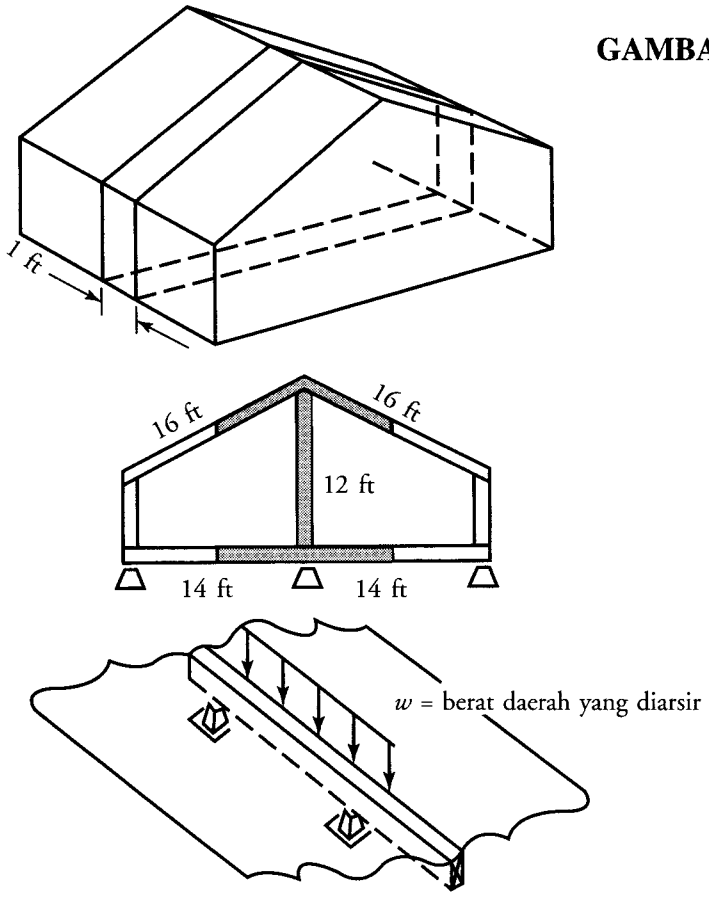
Respons dari sistem struktur yang menahan beban lateral terhadap gempa dan terpaan angin kencang merupakan masalah kompleks, yang dipelajari dalam bidang ilmu dinamika struktur. Secara umum, struktur didesain agar dapat menghindari resonansi dengan setiap kecepatan yang bekerja secara menerus oleh beban lateral pada struktur tersebut. Sebuah struktur yang mengalami resonansi akibat setiap terpaan angin atau goyangan gempa susulan akan mengalami gerakan-gerakan goyang lateral yang cenderung menimbulkan sinkronisasi dengan getaran-getaran beban, lalu goyangan akan terus bertambah besarnya hingga struktur tersebut runtuh. Untuk mencegah hal ini terjadi, para perancang menciptakan sistem-sistem struktur "yang diselaraskan" (*tuned*) yang menahan resonansi dengan pembebanan-pembebanan yang berulangkali dengan menggunakan massa struktur untuk "melemahkan" atau menunda respons beban, sehingga "memutuskan" irama gaya-gaya yang dinamis.

3.2 Daerah Pembebanan dan Jalur Beban

Ketika kita menganalisis atau mendesain berbagai jenis komponen dari sebuah sistem struktur, pertama-tama kita harus mengidentifikasi bagian beban yang ditumpu tiap-tiap elemen struktur. Kita bisa melakukan ini dengan menerapkan konsep kesetimbangan gaya terhadap struktur secara keseluruhan dan berbagai jenis subsistem struktur serta bagian struktur individual dari struktur tersebut. Pada bab-bab berikutnya dari buku ini, kita akan melihat cara penerapan hubungan tegangan dan deformasi untuk menentukan ukuran dari bagian struktur yang tepat, yang membatasi intensitas gaya dan deformasi dalam tingkatan yang aman dan layak.

Untuk mengidentifikasi beban-beban yang bekerja pada elemen-elemen struktur individual dari sebuah susunan struktur, kita perlu mengasumsikan sebuah daerah dari lantai, atap, atau dinding, yang menjadi tanggung jawab dari sebuah elemen struktur tertentu—daerah ini disebut *daerah pembebanan* (*tributary area*). Untuk menentukan daerah pembebanan dari sebuah elemen struktur seperti sebuah balok atau sebuah kolom, kita perlu menemukan jalur beban-beban dari atap dan lantai-lantai yang berada di atas, yang menuju ke bawah melalui susunan rangka bangunan (atau dinding pendukung-beban/*load-bearing wall*), dan kemudian menuju pondasi—yang disebut *jalur beban*. Jadi, daerah pembebanan dan jalur beban pada dasarnya sama, dengan istilah jalur

GAMBAR 3.4



beban seringkali dihubungkan dengan penentuan daerah pembebanan kumulatif untuk sebuah elemen struktur dalam sistem struktur yang rumit, seperti kolom interior pada lantai-lantai yang lebih rendah dari sebuah bangunan bertingkat-banyak.

Untuk mewujudkan daerah pembebanan sederhana dan jalur-jalur beban sederhana, pada Gambar 3.4, kita melihat sebuah rumah yang ditumpu oleh beberapa buah pilar, dan kita ingin menentukan beban mati per ft di sepanjang balok lantai tengah. Salah satu dari berbagai macam cara untuk meninjau situasi ini adalah dengan membayangkan rumah tersebut sebagai sepotong roti yang terbelah dua, di mana kita akan mengambil satu potongan sebesar 1 ft, seperti yang terlihat pada gambar. Karena setiap setengah bagian atap yang miring secara sama ditumpu oleh dinding-dinding eksterior dan dinding-dinding interior, maka tiap-tiap bagian atap tersebut mengikuti bagian tengah dari atap keseluruhan yang ditumpu oleh dinding pendukung-beban bagian dalam, yang secara langsung ditumpu oleh balok lantai tengah. Hal

yang sama juga dapat dinyatakan untuk dua bagian setengah lantai, sehingga balok lantai tengah juga memikul setengah dari lantai secara keseluruhan.

Beban mati per ft di sepanjang balok tengah lantai sama dengan berat bagian yang diarsir dari elemen-elemen struktur pada gambar, sehingga kita dengan mudah dapat mengetahui luas (dalam ft^2) dari tiap-tiap elemen struktur (atap, dinding, dan lantai), dan mengalikannya dengan berat satuan dari tiap-tiap elemen struktur tersebut. Apabila berat satuan dari tiap-tiap elemen struktur adalah q_{ATAP} = 10 psf, $q_{DINDING}$ = 6 psf, dan q_{LANTAI} = 12 psf, maka dari dimensi-dimensi yang diperlihatkan pada gambar, beban mati yang diletakkan oleh setiap potongan sebesar 1 ft dari rumah tersebut pada balok lantai tengah, w, adalah

$$w = (8 + 8)(10) + (12)(6) + (7 + 7)(12) = 400 \text{ plf}$$

Beban gempa bumi, beban angin, dan beban hidup juga diselesaikan dengan cara serupa, seperti yang akan kita lihat pada banyak penerapannya dalam buku ini.

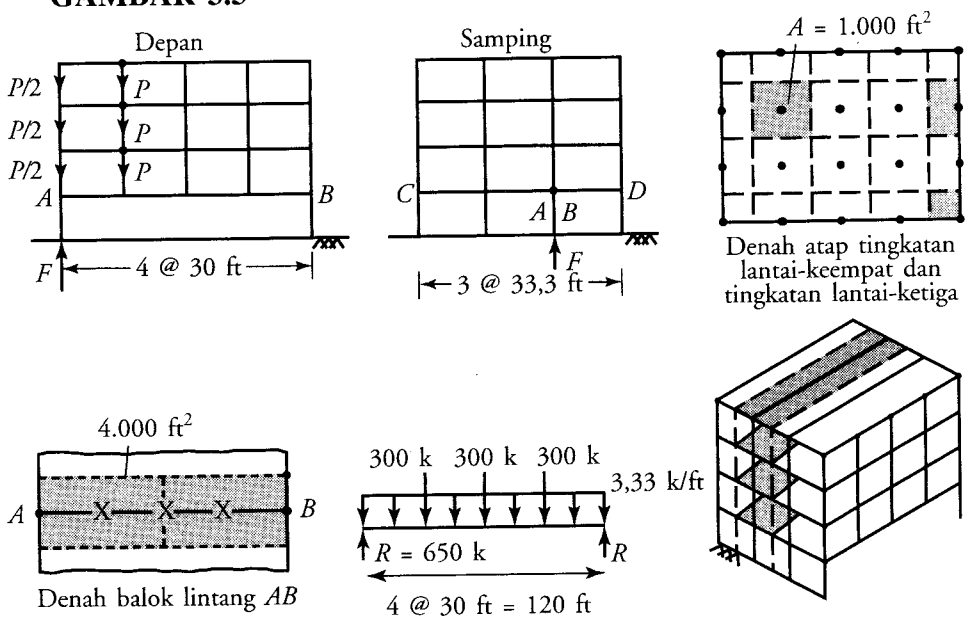
3.3 Jalur Beban pada Sebuah Bangunan Bertingkat-Banyak

Untuk struktur-struktur yang lebih kompleks, jalur beban harus ditemukan dari atas bangunan ke bawah bangunan, mengakumulasi semua daerah pembebanan yang terhubung dengan sebuah elemen struktur tertentu. Sebagai contoh, pada Gambar 3.5, kita melihat sebuah gedung perkantoran bertingkat-empat dengan panjang 120 ft dan lebar 100 ft serta dilengkapi dengan sebuah tempat parkir pada tingkat dasar, yang sejajar dengan permukaan tanah. Beban mati + beban hidup baik untuk balkon atap dan lantai adalah 30 lb/ft^2 + 70 lb/ft^2 yang menghasilkan sebuah beban rencana total sebesar 100 psf.

Dari pandangan denah tingkat atas, terlihat jelas bahwa dari atap dan tiap-tiap tingkat lantai atas, kolom-kolom interior menahan sebuah daerah pembebanan sebesar 30 × 33,3 = 1.000 ft^2, dengan batas-batas yang ditunjukkan oleh garis putus-putus. Gambar tersebut juga memperlihatkan bagaimana kolom-kolom eksterior tipikal menahan setengah dari daerah pembebanan ini, dan kolom-kolom pojok menahan seperempat dari daerah pembebanan tersebut.

Dari tampak samping dari gedung bertingkat-empat tersebut, dengan mengikuti jalur beban ke bawah menuju garis-garis kolom, kita melihat bahwa kolom-kolom interior dari tingkat kedua menahan beban dari atap, lantai-keempat, dan lantai-ketiga, serta menyalurkan beban ke balok

GAMBAR 3.5



utama transfer *AB*. Beban yang disalurkan tiap-tiap tingkat atas ke sebuah kolom adalah

$$P = 1.000 \times (30 + 70) = 100.000 \text{ lb}$$

Kita seringkali menyederhanakan 1.000 lb menjadi 1 *kilopound*, atau 1 kip (1 k), sehingga $P = 100$ k. Beban kumulatif pada kolom lantai-kedua adalah $3 \times P = 300$ k. Lambang X yang diperlihatkan pada denah dari balok utama *AB* menunjukkan tiga beban, masing-masing sebesar 300 k, yang disalurkan kolom-kolom interior lantai-kedua ke transfer.

Dengan melihat empat kolom interior dari lantai pertama, kolom-kolom tersebut harus menahan beban kumulatif dari tiga kolom eksterior tingkat-atas, sebesar setengah dari beban-beban kolom interior atau 150 k, dan reaksi-reaksi dari balok utama transfer. Kita melihat pada denah dan diagram beban *AB* bahwa balok utama transfer sepanjang 120 ft menahan tiga beban terpusat masing-masing sebesar 300 k dan beban terdistribusi dari daerah pembebanan lantai kedua seluas 4.000 ft²:

$$w = \frac{4.000 \times 100}{120} = 3.330 \text{ plf} = 3{,}33 \text{ klf}$$

Jadi, balok utama transfer menyalurkan sebuah reaksi ke kolom-kolom lantai-dasar di *A* dan *B* yang sama dengan

$$R = \frac{1}{2} \times [3 \times 300 + 3{,}33(120)] = 650 \text{ k}$$

Jalur yang digunakan oleh beban-beban vertikal dari atap ke bawah menuju kolom-kolom lantai-dasar bagian dalam (dan menuju pondasi) terkumpul menjadi

$$F = 150 + 650 = 800 \text{ k}$$

Sebagai alternatif, seperti yang terlihat pada gambar, kita dapat dengan mudah mengambil sebuah potongan interior tipikal dari bangunan dengan menyertakan keempat tingkat seluas 4.000 ft^2 sebesar 100 psf, untuk beban total sebesar 1.600 k, dan membagi beban tersebut menjadi dua bagian yang sama, F = 800 k, masing-masing ditahan oleh satu dari kedua kolom lantai pertama.

Latihan Apabila kolom-kolom bagian dalam dihilangkan dari lantai dasar, dan balok *CD* menjadi sebuah balok utama transfer, seperti apakah diagram beban untuk balok utama tersebut, dan berapakah beban, F, yang ditahan oleh masing-masing satu dari keempat kolom lantai-dasar yang tersisa?

3.4 Sistem Struktur

Sistem struktur tersusun dari elemen-elemen struktur individual dan/atau subsusunan-subsusunan struktur yang disambungkan bersama-sama sebagai suatu kesatuan untuk menahan beban-beban. Sambungan yang digunakan untuk mentransfer beban vertikal melalui struktur harus dipilih sesuai dengan sistem struktur yang digunakan untuk menahan beban lateral. Apabila sambungan sendi sederhana digunakan untuk mentransfer beban vertikal dari balok ke kolom dan menuju pondasi, maka sistem pengekang lateral diperlukan untuk menyalurkan gaya-gaya lateral menuju pondasi. Apabila penyambung kaku penahan momen digunakan, maka penyambung tersebut dapat berfungsi sebagai sambungan jepit pada sebuah struktur penahan momen beban lateral, namun pastinya struktur tersebut perlu diperkuat, dan elemen struktur balok yang lebih besar dan elemen struktur kolom yang lebih besar akan diperlukan.

Subsistem atap dan subsistem lantai pada struktur kayu menahan beban-beban vertikal, dan hampir selalu dibentuk dengan kayu lapis pada balok anak (*joist*) yang disambung-sendi dengan paku dan baut pada balok utama kayu lainnya atau kolom kayu lainnya, atau pada dinding-dinding pendukung-beban. Seperti yang akan kita lihat, subsistem horisontal ini seringkali secara struktur diperinci untuk bekerja sebagai pelat kaku besar yang disebut diafragma, yang membawa gaya-gaya lateral ke diafragma

kayu lapis vertikal, yang disebut dinding geser. Dinding geser seringkali akan digandakan menjadi sebuah dinding pendukung-beban vertikal.

Seperti halnya struktur kayu, struktur beton pracetak atau struktur baja juga dapat didesain sebagai sebuah sistem diafragma lantai dan diafragma atap horisontal yang dikekang lateral oleh rangka batang baja pengekang X atau rangka batang baja pengekang K, dan/atau dinding-dinding geser beton. Para perancang seringkali mendesain poros inti beton untuk pelayanan lift dan mekanik sebagai kolom kaku besar, yang dapat "disandari" oleh sebuah struktur rangka sederhana. Pada semua kasus tersebut, subsistem atap dan subsistem lantai membentuk pelat diafragma yang besar dan tidak memerlukan transfer momen ke kolom vertikal sehingga balok sederhana dapat digunakan pada sambungan kolom. Sambungan sederhana juga menyambungkan diafragma horisontal ke rangka pengekang atau ke dinding beton yang memikul gaya lateral.

Sebaliknya, apabila sebuah struktur harus bebas dari rangka pengekang X atau rangka pengekang K, atau bebas dari dinding geser solid untuk mempertahankan sebuah bentuk ruang yang terbuka, maka rangka struktur tersebut dapat saja menahan baik gaya lateral maupun gaya vertikal sebagai struktur rangka kaku, atau rangka momen. Pada kasus seperti ini, semua balok mentransfer gaya-gaya dan momen-momen lentur ke sambungan kolom melalui sambungan momen kaku. Rangka momen sangat memerlukan balok-balok yang lebih besar dan kolom-kolom yang lebih besar, terutama pada tingkat bawah struktur yang tinggi. Semua elemen struktur dalam sebuah rangka momen sebenarnya merupakan balok-kolom, dan interaksi tegangan serta kerampingan kolom (topik yang akan kita bahas nantinya dalam buku ini) harus ditinjau dalam analisis dan desain dari elemen-elemen struktur tersebut.

Untuk struktur yang sangat tinggi, atau struktur yang berada dalam daerah yang memiliki intensitas seismik yang tinggi, sistem penahan-beban redundan lateral campuran dapat digunakan, di mana rangka momen dirangkaikan pada sistem rangka batang, sistem dinding geser, dan/atau sistem pengekang lateral poros inti. Redundansi menghasilkan jalur-jalur beban dalam jumlah yang banyak pada sebuah sistem struktur, sehingga dalam batas tertentu, satu sistem bekerja sebagai cadangan bagi sistem yang lainnya dalam suatu kejadian struktur yang berbahaya. Selain itu, dengan menggunakan berbagai jenis sistem pengekang, yang masing-masing memiliki karakteristik respons beban berbeda, para perancang dapat mengubah respons dinamis dari sebuah struktur, sehingga struktur tersebut dapat "diselaraskan" untuk menahan resonansi dengan beban-beban gempa bumi dan beban-beban angin yang dinamis.

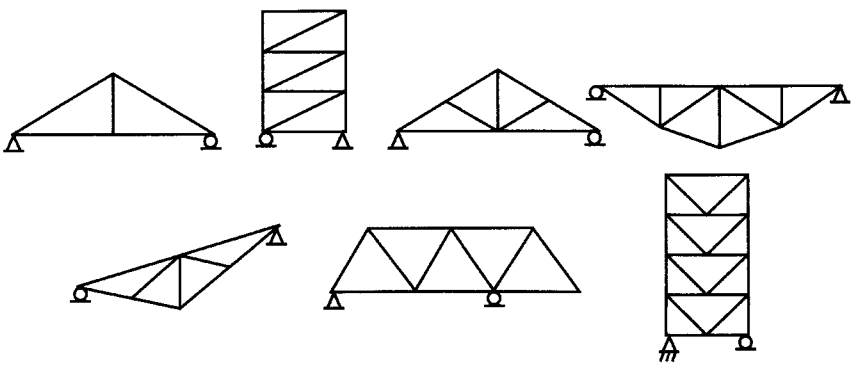
Ketika kita nantinya membahas analisis dari sistem struktur dan susunan struktur yang berbeda, kita akan melihat bahwa sistem struktur

dan susunan struktur diklasifikasikan sebagai tak tentu, apabila sistem-sistem struktur dan susunan-susunan struktur tersebut memiliki reaksi-reaksi yang tak diketahui yang lebih banyak daripada yang dapat ditentukan oleh persamaan-persamaan kesetimbangan yang diterapkan. Struktur tak tentu memiliki lebih banyak bagian struktur dan/atau lebih banyak sambungan daripada yang diperlukan oleh sebuah struktur agar berada dalam kesetimbangan. Hasilnya adalah terdapatnya jalur-jalur beban redundan menuju tanah yang dapat diikuti oleh beban lateral dan beban vertikal. Redundansi secara struktur merupakan hal yang diinginkan, karena memungkinkan beban-beban untuk menghindari titik-titik yang berbahaya ketika beban-beban tersebut melalui struktur. Analisis dari struktur-struktur redundan tak tentu dengan sendirinya lebih kompleks daripada analisis dari struktur-struktur non-redundan, dan umumnya kita akan membuat asumsi-asumsi penyederhanaan yang layak untuk melakukan analisis tanpa menggunakan komputer.

3.5 Rangka Batang (truss)

Sebuah struktur rangka batang adalah sebuah susunan struktur yang tersusun dari bagian struktur dua-gaya yang tersambung bersama-sama ke sebuah tatanan dari segitiga-segitiga dengan berbagai macam bentuk. Beberapa contoh dari struktur rangka batang diperlihatkan pada Gambar 3.6. Struktur rangka batang dapat digunakan untuk menghubungkan sebuah jarak sepanjang yang diinginkan, dan terutama digunakan secara umum untuk bangunan dengan bentang lantai serta atap yang besar, dan juga digunakan untuk jembatan-jembatan yang panjang. Apabila sebagian besar dari elemen-elemen struktur dan susunan-susunan struktur

GAMBAR 3.6



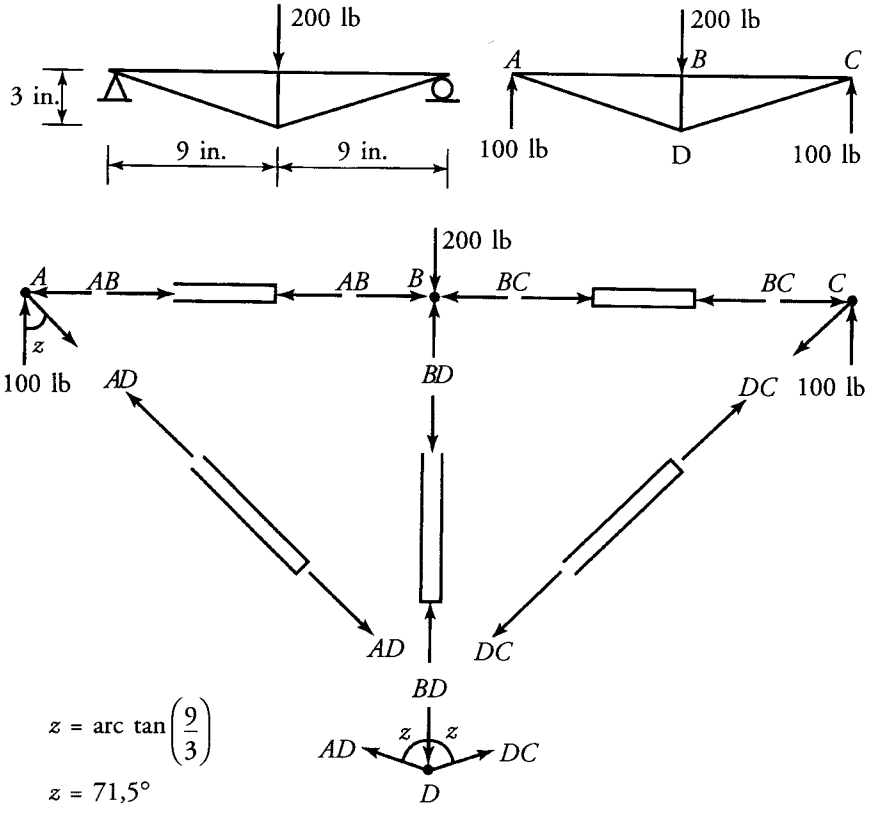
umumnya ditutupi dengan plafon, lantai, dan dinding dengan tujuan dramatisasi dan estetika, rangka-rangka batang seringkali dengan sengaja dibiarkan terbuka, demi mendapatkan suatu tampilan arsitektural pada sebuah struktur. Terdapat banyak jembatan kayu antik dan historis yang menghiasi lansekap daerah pedesaan. Struktur seperti ini biasanya menyembunyikan bentuk-bentuk yang indah dari rangka-rangka batang kayu yang sudah tua, yang hanya dapat dilihat dari bagian dalam struktur tersebut. Hal ini merupakan satu dari banyak alasan mengapa banyak orang ingin melewati jembatan-jembatan tersebut, selain mengaguminya dari kejauhan.

Idealnya, beban-beban rangka batang diterapkan hanya pada titik sambungan dari bagian struktur, yang disebut *titik kumpul* (*joint*). Rangka-rangka batang dibangun dengan konstruksi sedemikian rupa sehingga sumbu memanjang dari tiap-tiap bagian struktur yang tersambung bertemu di titik kumpul, dan tiap-tiap titik kumpul itu dapat ditinjau sebagai sistem gaya yang konkuren. Rangka-rangka batang diasumsikan untuk berperilaku seperti sebuah sendi yang menyambungkan semua bagian struktur dan beban-beban apapun yang diterapkan pada tiap-tiap titik kumpul, yang biasanya dikenal sebagai sebuah *sambungan sendi*. Walaupun mungkin diperlukan banyak pengunci (*fastener*) untuk membentuk sebuah titik kumpul rangka batang tunggal yang besar, fakta bahwa semua beban yang tersambung adalah konkuren menghasilkan bagian struktur yang diasumsikan mentransfer momen-momen yang dapat diabaikan di antara bagian struktur itu sendiri pada sambungan-sambungan sendi yang teridealisasi.

Setiap bagian struktur dua-gaya dari sebuah rangka batang menarik kedua titik kumpul ujungnya bersama-sama (bagian struktur tarik), atau mendorong ke arah yang berlawanan dengan titik kumpulnya (bagian struktur tekan). Pada Gambar 3.7, kita melihat sebuah rangka batang yang dipisahkan menjadi titik kumpul-titik kumpul dan bagian struktur. Untuk mendesain sebuah rangka batang, kita dapat menentukan gaya-gaya pada setiap bagian struktur dengan menggunakan pendekatan analisis gaya konkuren titik kumpul-demi-titik kumpul. Apabila untuk beberapa alasan tertentu kita perlu menganalisis gaya-gaya hanya pada beberapa bagian struktur dari sebuah rangka batang yang besar, kita akan menggunakan metode potongan yang serupa dengan metode penampang balok untuk menentukan momen internal dan geser internal.

Dalam sebuah analisis titik kumpul-demi-titik kumpul dari sebuah rangka batang, pertama-tama reaksi-reaksi tumpuan ditentukan dengan menggunakan tiga persamaan kesetimbangan dari rangka batang secara keseluruhan. Reaksi-reaksi ini kemudian diperlakukan sebagai beban-beban titik kumpul, seperti halnya beban-beban titik kumpul yang diterapkan.

GAMBAR 3.7



Kita biasanya memulai dengan sebuah titik kumpul tumpuan, kemudian dilanjutkan dengan titik-kumpul-demi-titik-kumpul, dan menyelesaikan persamaan kesetimbangan horisontal serta persamaan kesetimbangan vertikal untuk dua gaya bagian struktur yang tak diketahui pada tiap-tiap titik kumpul yang terpisah. Solusi dari persamaan-persamaan pada setiap titik kumpul akan menunjukkan gaya pada setiap bagian struktur.

Dalam memilih titik kumpul yang secara berturut-turut akan dianalisis, Anda harus memilih salah satu titik kumpul yang memiliki tidak lebih dari dua bagian struktur yang tak diketahui, karena hanya terdapat dua persamaan yang dapat digunakan per titik kumpul. Apabila sebuah bagian struktur diasumsikan berada dalam tarik dan ditemukan memiliki sebuah nilai yang negatif, maka bagian struktur tersebut berada dalam tekan, dan begitu pula sebaliknya.

Sebagai contoh, rangka batang yang dilepaskan dari susunannya, seperti yang diperlihatkan pada gambar, menahan sebuah beban tunggal seberat 200 lb. Sebuah gambar yang terpisah memperlihatkan bahwa titik kumpul-titik kumpul yang diberi label dan reaksi-reaksi tumpuan

yang terhitung sama dengan setengah dari beban sebesar 200 lb pada kasus pembebanan simetris ini. Sudut $z = 71{,}5°$ juga terlihat dihitung dari geometri rangka batang. Rangka batang yang berbentuk tonggak raja (*king post*) terbalik ini terlihat serupa dengan pijakan yang lazim digunakan untuk sebuah tangga kayu yang diperkuat dengan sebuah batang baja. Bagian struktur *AB* dan bagian struktur *BC* membentuk pijakan kayu, sedangkan bagian struktur *AD* dan bagian struktur *DC* membentuk batang baja, dan bagian struktur *BD* adalah sebuah blok kayu. Dengan beban-beban yang lebih besar dan dimensi-dimensi yang lebih besar, rangka batang tersebut dengan mudah dapat ditinjau sebagai sebuah jembatan kecil, dan Anda dapat melihat banyak bentuk rangka-rangka batang atap tonggak raja yang terbuka di gereja-gereja tua dan ruangan-ruangan besar dari struktur-struktur yang megah.

Gaya-gaya bagian struktur diasumsikan bekerja seperti yang diperlihatkan pada gambar. Persamaan kesetimbangan gaya vertikal dan gaya horisontal secara berurutan untuk titik kumpul *A* adalah

$$100 - \cos(71{,}5°) \times AD = 0$$

$$\sin(71{,}5°) \times AD - AB = 0$$

Persamaan-persamaan di atas menunjukkan pada kita bahwa $AD = 315$ lb tarik, dan $AB = 299$ lb tekan. Pada titik kumpul *B*, persamaan-persamaan tersebut menunjukkan pada kita bahwa

$$BD - 200 = 0$$

$$AB - BC = 0$$

Kita melihat bahwa $BD = 200$ lb, tekan, dan karena $AB = 299$ lb, begitu pula dengan *BC*. Kita dapat melanjutkan ke titik kumpul *C* atau titik kumpul *D* untuk membuktikan kebenaran bahwa $CD = 315$ lb, tarik seperti halnya *AD*.

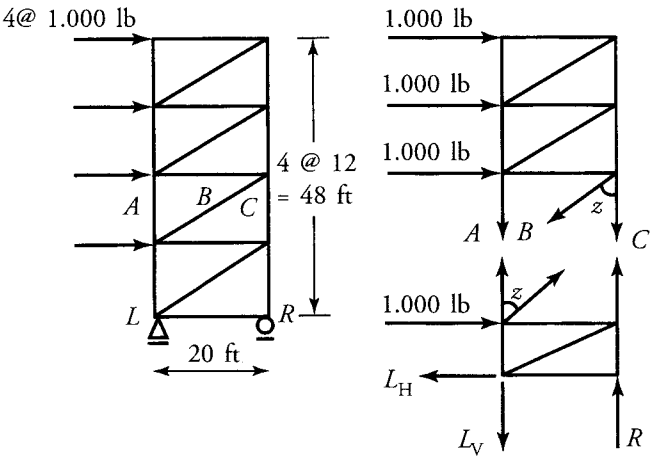
Perlu diperhatikan dengan seksama bahwa apabila banyaknya persamaan (2 × banyak titik kumpul) lebih sedikit daripada banyaknya anu yang tak diketahui (banyaknya bagian struktur + 3), maka rangka batang adalah tak tentu, sehingga tidak terdapat cukup persamaan kesetimbangan untuk menyelesaikan gaya-gaya bagian struktur yang tak diketahui. Kadang-kadang kita dapat membuat sebuah rangka batang tak tentu menjadi rangka batang tentu, apabila kita dapat mengidentifikasi bagian struktur yang tidak menahan beban, dan mengabaikan bagian-bagian struktur yang tidak menahan beban tersebut. Ini merupakan pendekatan yang umumnya digunakan untuk bagian-bagian struktur baja ringan atau bagian-bagian struktur kabel, yang mengalami ketidaksetimbangan apabila mengalami tekan dalam beberapa situasi

merupakan hal yang biasa untuk rangka-rangka batang ikatan angin ketika angin menerpa).

Metode titik kumpul sangat baik diterapkan untuk rangka-rangka batang dengan ukuran kecil, tetapi metode yang dipilih dalam menentukan gaya pada anggota-anggota struktur rangka batang yang dipilih—khususnya untuk rangka-rangka batang dengan ukuran yang besar—adalah menggunakan metode potongan yang telah dibahas untuk balok-balok. Sebuah rangka batang dapat ditinjau sebagai sebuah balok yang besar. Seperti terlihat pada Gambar 3.8, setelah pertama-tama menentukan reaksi-reaksi tumpuan, kita dapat memotong rangka batang tersebut menjadi masing-masing setengah bagian, dengan memotong tidak lebih daripada tiga anggota struktur. Kita selanjutnya menentukan ketiga gaya bagian struktur yang tak diketahui dengan menggunakan persamaan kesetimbangan momen, persamaan gaya horisontal, dan persamaan gaya vertikal yang diterapkan pada satu dari penampang-penampang setengah bagian tersebut.

Rangka batang kantilever vertikal pada gambar dapat digunakan untuk memberikan pengekangan pada sebuah bangunan terhadap beban-beban angin. Apabila kita ingin mengetahui gaya-gaya pada bagian-bagian struktur yang ditandai dengan *A*, *B*, dan *C*, kita dapat memotong rangka batang menjadi dua bagian, mengekspos ketiga gaya seperti yang terlihat pada gambar. Apabila kita mengerjakannya dengan porsi atas dari rangka batang, maka kita tidak perlu menghitung reaksi-reaksi, karena reaksi-reaksi tersebut tidak bekerja pada penampang setengah bagian atas. Sudut z dihitung sebagai z = arc tan(20/12) = 59°. Persamaan kesetimbangan gaya horisontal menjadi

$$3 \times 1.000 - B \times \sin(59°) = 0$$



GAMBAR 3.8

dengan B = 3.500 lb, tarik. Apabila kita menjumlahkan momen-momen pada titik kumpul di mana B dan C bertemu, maka satu-satunya yang tak diketahui pada persamaan adalah A:

$$1.000 \times 12 + 1.000 \times 24 - A \times 20 = 0$$

A = 1.800 lb, tarik. Pada akhirnya, persamaan kesetimbangan gaya vertikal yang ditulis untuk C adalah sebagai berikut:

$$-C - A - B \times \cos(59°) = 0$$

$$-1.800 - 3.500(0{,}515) = C$$

$$C = -3.600 \text{ lb} = 3.600 \text{ lb, tekan}$$

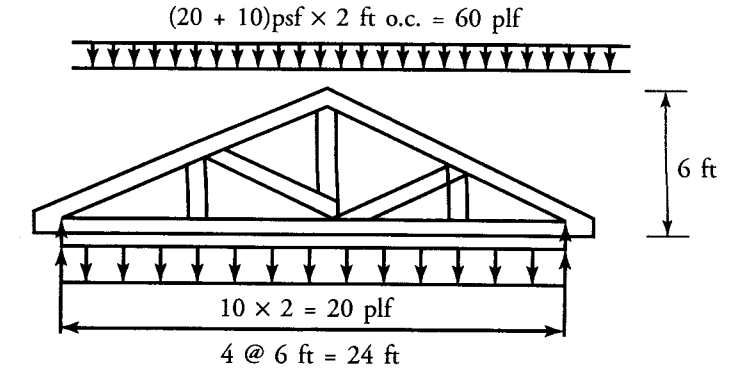
Kita mengasumsikan bahwa C berada dalam tarik ketika kita menggambarkan C melakukan penarikan pada titik-titik kumpul. Kita menemukan bahwa C merupakan sebuah gaya yang negatif, maka C berada dalam keadaan tekan dan melakukan dorongan pada titik-titik kumpul ujungnya.

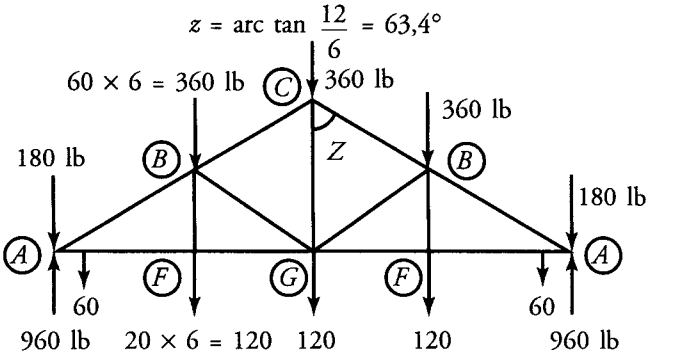
3.6 Rangka Batang Atap

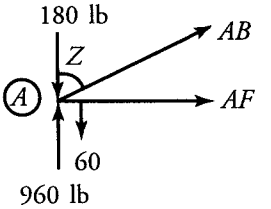
Sebuah bentuk konstruksi atap ringan yang umum digunakan pada struktur untuk kawasan pemukiman dan struktur bangunan perniagaan kecil melibatkan penggunaan rangka-rangka batang kayu prafabrikasi, yang terbuat dari papan-papan yang memiliki penampang melintang tipikal berukuran 2 in. × 4 in., seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.9.

Unit-unit prabangun ini menggantikan kasau-kasau balok anak individual, dan diperlukan pengekang-pengekang untuk peletakan atap-atap tongkat-bangun (*stick-built*) yang umumnya diletakkan satu per satu, sehingga biaya tambahan untuk prafabrikasi dari rangka-rangka batang dapat mengurangi upah tambahan buruh bangunan yang terkait dengan cara pendekatan tongkat-bangun yang lebih lambat. Rangka batang prafabrikasi biasanya terpisah dengan jarak 2 ft satu dengan yang lainnya, serupa dengan balok-balok anak dan kasau-kasau, yang biasanya memiliki jarak 16-24 in., di tengah.

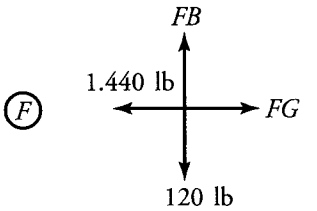
Pemasangan dek plafon dan pemasangan atap dilakukan dengan memaku seluruh bagian-bagian struktur di sepanjang bagian atap yang miring dan rangka batang plafon horisontal, jadi beban-beban yang disalurkan ke rangka-rangka batang tidak terkonsentrasi di titik kumpul-titik kumpul. Namun demikian, untuk melakukan sebuah analisis rangka batang, kita bisa saja mengasumsikan beban-beban titik kumpul ekivalen



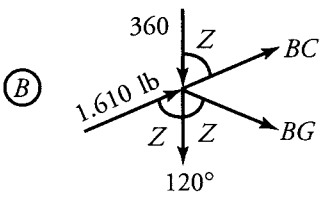




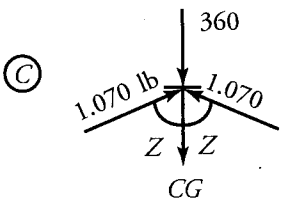
$960 - 180 - 60 + AB \cos Z = 0$
$AB = -1.610 = 1.610$ lb C
$(-1.610) \sin Z + AF = 0$
$AF = 1.440$ lb T



Dengan pemeriksaan:
$FB = 120$ lb T
$FG = 1.440$ lb T



$1.610 \sin Z + BC \sin Z + BG \sin Z = 0$
$1.610 \cos Z + BC \cos Z - BG \cos Z = 480$
$BC = -1.070 = 1.070$ lb C
$BG = -540 = 540$ lb C



$2 \times 1.070 \cos Z - 360 - CG = 0$
$CG = 600$ lb T

GAMBAR 3.9

dengan menempatkan setengah dari beban yang dipikul oleh tiap-tiap bagian struktur, masing-masing pada kedua ujung titik kumpulnya. Beban atap yang ditetapkan oleh banyak standar perancangan bangunan adalah 20 psf, dan terletak secara nominal pada proyeksi atap horisontal bersama-sama dengan beban mati yang diperkirakan, biasanya sebesar 10 psf. Beban hidup plafon dan beban mati plafon hanyalah sebesar 10 psf, karena ruang loteng tidak memungkinkan seseorang untuk bergerak dengan bebas, sehingga ruang loteng tersebut hanya dapat digunakan untuk penyimpanan barang-barang yang ringan. Beban-beban titik kumpul yang dihasilkan untuk situasi seperti ini diperlihatkan pada gambar.

Kita ingin menentukan gaya pada semua bagian struktur, dengan memperhatikan bahwa bentuk simetri dari rangka batang akan memotong hasil analisis menjadi masing-masing setengah bagian. Pertama-tama, didapatkan reaksi-reaksi tumpuan eksternal pada tiap ujung—reaksi-reaksi tersebut hanyalah setengah dari seluruh beban ke arah bawah pada rangka batang, atau

$$A = 24 \text{ ft} \times (60 + 20) \text{ plf} \times \frac{1}{2} = 960 \text{ lb}$$

Sudut yang terbentuk oleh semua bagian-bagian struktur yang miring dengan sebuah garis vertikal terlihat menjadi $z = 63{,}4°$.

Dimulai dari tumpuan *A*, gaya-gaya konkuren yang diketahui diterapkan pada titik kumpul dan gaya-gaya bagian struktur yang tak diketahui diasumsikan secara sembarang berada dalam tarik sehingga menarik pada titik kumpul. Persamaan-persamaan kesetimbangan dituliskan di samping titik kumpul *A* seperti terlihat pada gambar, dan gaya-gaya yang tak diketahui adalah *AB* = –1.610 = 1.610 lb, C (*compression*/tekan), dan *AF* = 1.440 lb, T (*tension*/tarik). Perhatikan bagaimana tanda negatif dari *AB* disertakan dalam persamaan-persamaan ketika menentukan *AF*. Kita tidak dapat langsung melanjutkan ke titik kumpul *B*, karena titik kumpul tersebut memiliki tiga anu yang tak diketahui, namun titik kumpul *F* menunjukkan jawaban yang jelas untuk bagian-bagian struktur yang tak diketahui, *FG* = 1.440 lb, tarik, dan *FB* = 120 lb, tarik.

Sekarang kita melanjutkan ke titik kumpul *B*. Semua gaya yang diketahui secara tepat diterapkan, dan dua persamaan dari dua anu yang tak diketahui harus diselesaikan secara simultan untuk menemukan bahwa baik *BC* maupun *BG* telah diasumsikan secara keliru, dan kita menemukan bahwa *BC* = 1.070 lb, tekan, dan *BG* = 540 lb, tekan. Pada akhirnya, di titik kumpul *C*, kesetimbangan vertikal dan simetris horisontal menunjukkan bahwa gaya bagian struktur terakhir yang tak diketahui pastinya adalah *CG* = 600 lb, tarik.

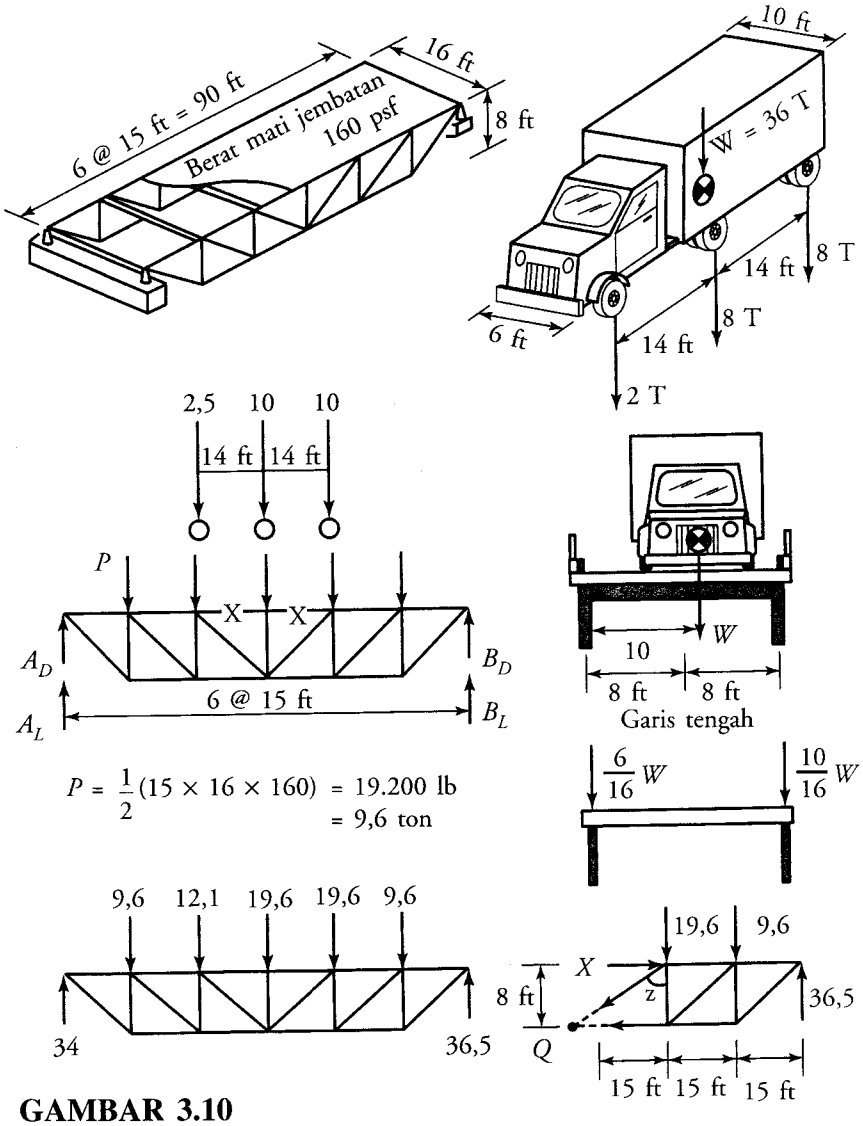
Latihan Hilangkanlah dua bagian struktur dengan label *BF* dan hilangkanlah beban ruang loteng sebesar 10 psf, kemudian analisis kembali rangka batang ini.

3.7 Penentuan Taraf Beban dari Sebuah Jembatan Rangka Batang Dek

Gambar 3.10 memperlihatkan sebuah jembatan rangka batang dek sempit, yang dibangun oleh sebuah perusahaan perkayuan swasta untuk memungkinkan truk dan peralatan berat dari perusahaan tersebut menyeberangi sebuah sungai dengan bentang 90 ft. Pihak Departemen Jalan Raya dari pemerintah negara bagian telah mendapatkan izin agar publik dapat menggunakan jembatan tersebut sebagai sebuah jalan memutar alternatif apabila jembatan milik negara bagian yang dekat lokasinya dengan jembatan tersebut ditutup untuk perbaikan-perbaikan darurat setelah rusak akibat bencana tanah longsor. Untuk memastikan keamanan struktur jembatan tersebut sebelum digunakan oleh publik, insinyur jembatan dari pemerintah negara bagian harus melakukan sebuah penentuan taraf beban dari struktur, untuk menentukan apakah struktur tersebut cukup kuat memikul beban truk desain yang legal sebesar 36 ton, yang diperlihatkan pada gambar yang menunjukkan dimensi-dimensi truk dan beban-beban roda dari truk.

Jembatan terdiri dari dua rangka batang yang terpisah sejarak 16 ft dan membentuk sebuah jalur jalan raya yang pada dasarnya hanya memungkinkan lalu lintas untuk satu lajur kendaraan. Rangka-rangka batang berada di bawah dek jalan raya (oleh karena itu, dinamakan rangka batang dek) yang terdiri dari panel-panel slab beton yang membentang sepanjang 15 ft dalam arah jalan raya. Lantai tersebut ditumpu oleh balok-balok melintang yang menyalurkan setengah berat dek ke tiap-tiap rangka batang pada titik kumpul-titik kumpulnya yang menyambungkan bagian struktur di sepanjang bagian atas rangka batang—bagian-bagian struktur tersebut membentuk apa yang dikenal sebagai kord atas (*top chord*). Apabila berat mati untuk jembatan secara keseluruhan, termasuk dek, balok-balok melintang, dan rangka-rangka batang tersebar secara merata pada daerah dek, beban tersebut menjadi 160 psf. Beban mati jembatan yang tersebar secara merata ini menghasilkan beban-beban titik kumpul sebesar 19.200 lb = 9,6 ton di sepanjang batang atas.

Beban hidup truk yang diterapkan pada satu dari kedua rangka batang bisa jadi lebih besar daripada setengah beban truk seberat 36 ton tersebut, bergantung pada lebar jalan raya dan dimensi dari truk. Hal ini



GAMBAR 3.10

diakibatkan oleh truk yang dapat bergerak menjauh dari garis tengah jalan raya tersebut, dan pusat gaya berat dari truk akan lebih dekat dengan salah satu rangka batang, seperti terlihat pada gambar. Dengan menjumlahkan momen-momen di sekitar rangka batang yang lebih jauh, kita menemukan bahwa alih-alih harus menahan setengah (50%) dari berat truk, satu rangka batang harus memikul $\frac{10}{16}$ dari berat truk tersebut, atau 63%. Angka tersebut melambangkan apa yang disebut insinyur jembatan sebagai faktor distribusi beban hidup, dan memperlihatkan pada kita bahwa sebuah rangka batang yang dibebani secara kritis menahan 63% dari beban-beban as roda truk yang legal sebesar 4 ton di bagian depan, 16 ton di bagian tengah, dan 16 ton di bagian belakang. Jadi.

beban hidup truk untuk rangka batang terdiri dari tiga beban terkonsentrasi sebesar 2,5 ton, 10 ton, dan 10 ton, yang terpisah dengan jarak 14 ft.

Beban total yang diterapkan di sepanjang titik kumpul-titik kumpul kord atas diperlihatkan pada gambar, beserta reaksi-reaksi tumpuan rangka batang yang dihitung. Truk tersebut diletakkan di tengah bentang untuk menghasilkan gaya tertinggi pada bagian-bagian struktur yang paling diperhatikan oleh ahli-ahli teknik jembatan, dan ditandai dengan tanda "X". Bagian-bagian struktur yang kritis ini memikul gaya tekan terbesar dari bagian-bagian struktur manapun, dan diketahui memiliki kapasitas beban tekan aman sebesar 240.000 lb, atau 120 ton. Dengan as roda tengah dari truk diletakkan di tengah bentang, as-as roda luar dari truk cukup dekat untuk ditinjau langsung di atas titik kumpul-titik kumpul yang terdekat. Dari kesetimbangan horisontal di titik kumpul yang digunakan bersama-sama oleh kedua bagian struktur kord atas, kita melihat bahwa kedua bagian struktur batang atas tersebut memikul beban yang sama.

Apabila kita perlu mengecek gaya hanya pada satu atau dua bagian struktur dari sebuah rangka batang yang besar, kita menggunakan metode potongan. Dengan memotong rangka batang tersebut menjadi dua bagian dan mengerjakan setengah bagian sebelah kanan, kita dapat menjumlahkan momen-momen pada titik yang diberi label Q, dan kita mendapatkan

$$X(8) + 19{,}6(15) + 9{,}6(30) - 36{,}5(45) = 0$$

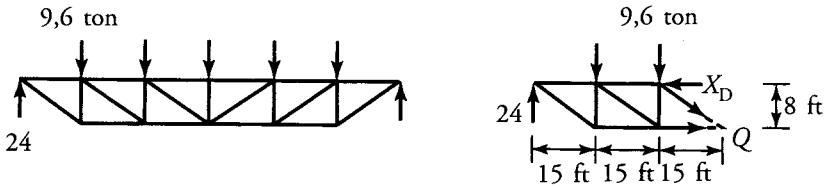
Kita mendapatkan $X = 132$ ton, yang lebih besar daripada kapasitas anggota struktur yang aman sebesar 120 ton, sehingga jembatan tersebut tidak dapat memikul beban penuh yang legal, dan jembatan tersebut hanya dapat dilalui oleh beban truk yang kurang daripada 36 ton. Sedangkan, truk dengan beban lebih berat daripada 36 ton, yang sebelumnya legal, harus dilarang melewati jembatan.

Pada Gambar 3.11, metode potongan diterapkan secara terpisah, sehingga gaya total pada bagian struktur kritis, $X = 132$ ton, terbagi menjadi dua gaya, yaitu gaya akibat beban mati, $X_D = 81$ ton, dan gaya yang dihasilkan oleh beban hidup truk sebesar 36 ton, yaitu $X_L \approx 51$ ton. Kapasitas yang dimungkinkan oleh bagian struktur kritis untuk dapat menahan beban hidup adalah

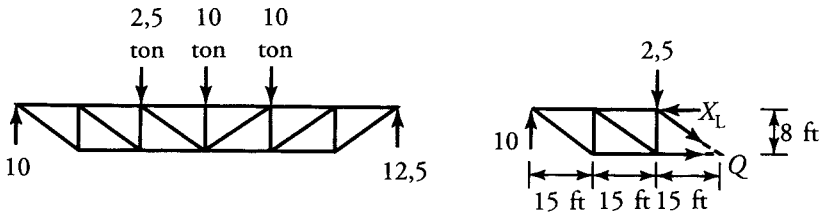
$$X_{KAP} = 120 - 81 = 39 \text{ ton}$$

Ini berarti bahwa fraksi dari sebuah truk yang membawa beban penuh seberat 36 ton yang dapat ditumpu bagian struktur tersebut dengan aman adalah

$$\frac{X_{KAP}}{X_L} = \frac{39}{51} = 0{,}76$$



$$X_D = \frac{-9{,}6(15) - 9{,}6(30) + 24(45)}{8} = 81 \text{ ton}$$



$$X_L = \frac{-2{,}5(15) + 10(45)}{8} = 51 \text{ ton}$$

GAMBAR 3.11

Ini menunjukkan pada kita berapa bagian dari beban aman yang legal (sebelumnya 36 ton) yang dapat dipikul oleh jembatan, dan pada kasus ini adalah

Beban yang diizinkan = 0,76 × 36 ton = 27 ton

Jadi, insinyur jembatan akan membuka jembatan tersebut untuk publik, namun dengan sebuah rambu beban yang menyatakan bahwa struktur tersebut melarang truk yang memiliki tiga as roda dengan berat lebih dari 27 ton.

Latihan Kerjakan kembali soal ini dengan mengasumsikan bahwa rangka-rangka batang terpisah berjarak 20 ft, dan bukan 16 ft. ■

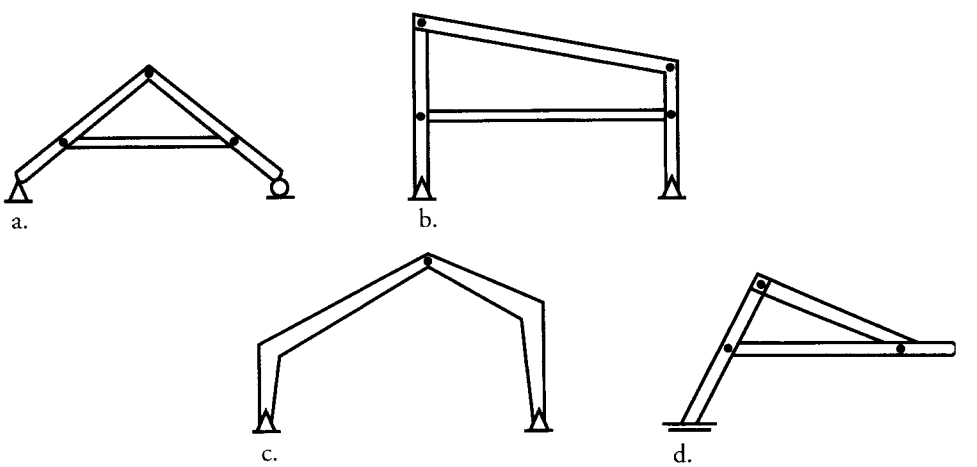
3.8 RANGKA

Rangka adalah sebuah kata yang terlintas di benak banyak orang ketika kata *struktur* digunakan. Struktur menimbulkan suatu imajinasi mengenai kerangka baja dari gedung pencakar-langit dalam konstruksi. dan memang benar, kerangka baja dari gedung-gedung seperti itu adalah sebuah struktur rangka. Dalam skala yang lebih kecil, struktur-struktur

pada Gambar 3.12 sampai dengan Gambar 3.15 juga merupakan struktur-struktur rangka. Struktur-struktur rangka yang lebih kompleks yang terkait dengan struktur yang lebih besar paling baik dianalisis dengan program komputer khusus dan hal itu berada di luar lingkup pembahasan kita untuk saat ini.

Struktur rangka merupakan susunan (rakitan) struktural dari semua jenis bagian struktur: bagian-bagian struktur dua-gaya, dan elemen-elemen struktur yang dibebani secara transversal seperti balok-balok dan elemen-elemen struktur yang berbentuk tak teratur. Bahkan struktur kabel, struktur lengkungan, dan struktur rangka batang bisa saja merupakan subsusunan struktur rangka. Dengan begitu banyaknya kemungkinan dari susunan struktur rangka, kita harus membatasi pembahasan kita mengenai susunan struktur tersebut, dan hanya membahas susunan struktur dengan sambungan sendi—yang sering disebut *engsel* untuk struktur rangka. Seperti titik kumpul-titik kumpul dari sebuah rangka batang, momen-momen yang dapat diabaikan ditransfer di antara dua bagian struktur rangka pada sebuah engsel. Kita akan membatasi analisis kita hanya mengenai struktur rangka dengan engsel-engsel yang menyambungkan tidak lebih dari dua anggota struktur, sehingga pada setiap engsel, kedua bagian struktur yang tersambung saling menggunakan gaya satu sama lain, yang biasanya dilambangkan dengan kedua komponen gaya yang tak diketahui dari kedua bagian struktur tersebut. Gambar 3.12 memperlihatkan beberapa contoh dari struktur rangka yang diengsel.

Oleh karena beberapa jenis struktur rangka tertentu bisa saja memiliki lebih dari tiga reaksi tumpuan (rangka (b) dan rangka (c) pada gambar masing-masing memiliki empat komponen reaksi tumpuan), kita biasanya

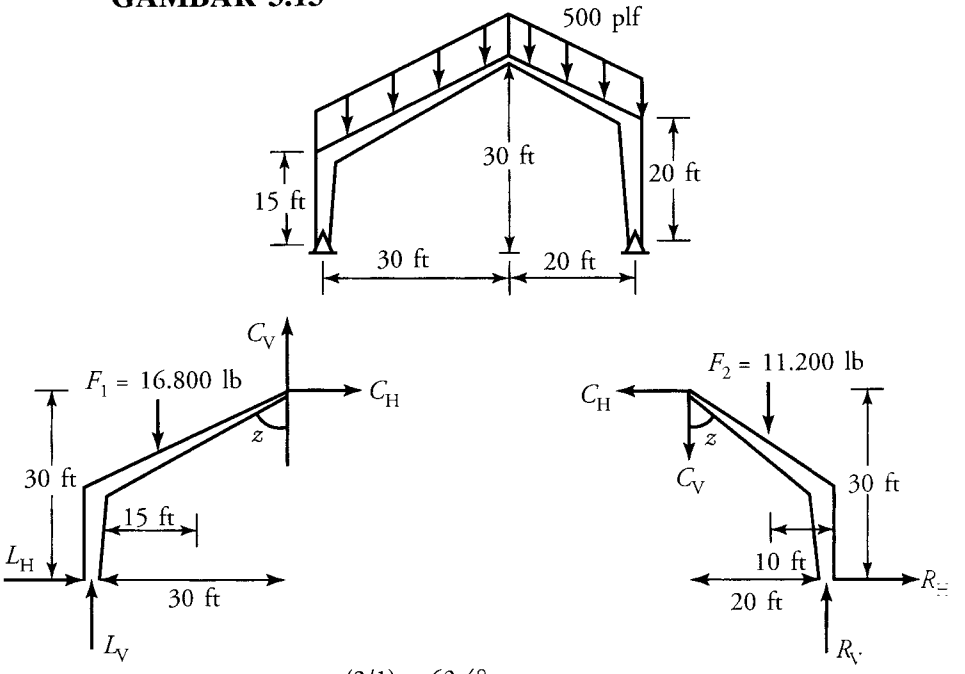


GAMBAR 3.12

tidak dapat menerapkan persamaan-persamaan kesetimbangan untuk rangka secara keseluruhan, seperti yang biasanya kita lakukan untuk rangka-rangka batang tentu dan balok-balok tentu. Selain itu, tidak seperti rangka-rangka batang yang hanya dibebani di titik kumpul-titik kumpul, beban-beban yang diterapkan dapat diterapkan di mana saja, di sepanjang bagian struktur rangka. Untuk menganalisis gaya-gaya pada tiap-tiap elemen struktur dari sebuah struktur rangka, kita harus membongkar susunan struktur pada engselnya dan memisahkan anggota-anggota strukturnya secara individual, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.13 untuk rangka yang berbentuk segitiga tak simetris dengan tiga engsel.

Tiga persamaan kesetimbangan dituliskan untuk tiap-tiap anggota struktur yang telah dipisahkan. Persamaan-persamaan tersebut digunakan untuk menyelesaikan komponen-komponen gaya yang tak diketahui pada tiap-tiap engsel. Rangka akan menjadi rangka tak tentu apabila banyaknya persamaan kesetimbangan (3 × banyaknya anggota struktur) lebih sedikit daripada banyaknya komponen gaya yang tidak diketahui (2 × banyaknya

GAMBAR 3.13



$$z = \arctan(2/1) = 63{,}4°$$

$$F_1 = 500 \times \frac{30}{\sin(63{,}4°)} = 16.800 \text{ lb}$$

$$F_2 = 500 \times \frac{20}{\sin(63{,}4°)} = 11.200 \text{ lb}$$

sendi + banyaknya reaksi tumpuan). Semua rangka pada Gambar 3.12 adalah rangka tentu.

Rangka berbentuk segitiga tak simetris pada Gambar 3.13 adalah sebuah struktur tentu dengan tiga sendi—satu di tumpuan sebelah kiri, satu di tumpuan sebelah kanan, dan satu di puncak rangka. Terdapat empat komponen reaksi tumpuan, sehingga kita tidak dapat menerapkan tiga persamaan kesetimbangan pada rangka secara keseluruhan untuk menentukan reaksi-reaksinya. Kita akan memisahkan struktur tersebut menjadi bagian-bagian struktur sebelah kiri dan bagian-bagian struktur sebelah kanan, masing-masing bekerja di atas dengan bagian beban atap, dan dengan kedua komponen gaya engsel pada tiap-tiap sambungan sendi, seperti yang terlihat pada gambar. Perhatikan bahwa pada puncak rangka, komponen-komponen dari gaya sendi yang terbagi harus bekerja secara sama dan berlawanan pada bagian-bagian struktur yang tersambung. Untuk menyelesaikan enam anu yang tak diketahui, kita akan menulis ketiga persamaan kesetimbangan baik untuk bagian sebelah kiri maupun bagian sebelah kanan bagian-bagian struktur tersebut.

Persamaan-persamaan kesetimbangan untuk gaya-gaya vertikal, gaya-gaya horisontal, dan momen-momen di sekitar tumpuan untuk bagian-bagian struktur sebelah kiri masing-masing adalah,

$$L_V - 16.800 + C_V = 0$$

$$L_H + C_H = 0$$

$$16.800(15) - C_V(30) + C_H(30) = 0$$

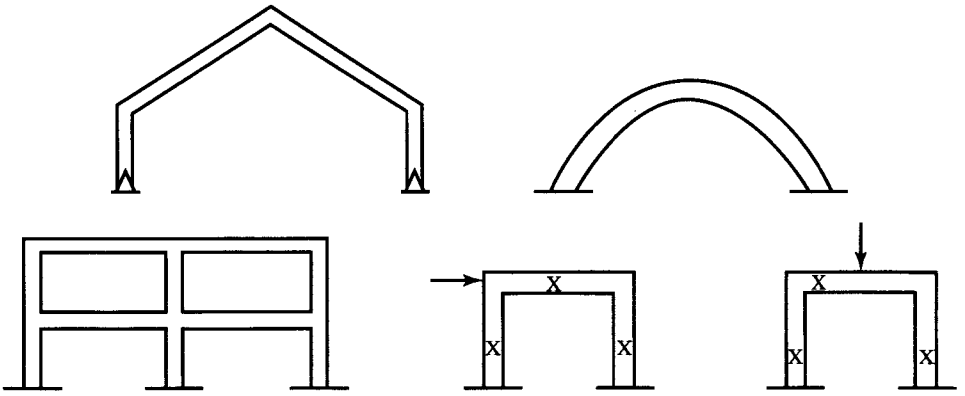
Dan untuk bagian-bagian struktur sebelah kanan, secara serupa kita mendapatkan

$$R_V - 11.200 - C_V = 0$$

$$R_H - C_H = 0$$

$$-11.200(10) - C_V(20) - C_H(30) = 0$$

Sayangnya, tidak satupun dari enam persamaan ini secara langsung menghasilkan sebuah jawaban untuk satu dari enam anu yang tak diketahui. Kedua persamaan momen dapat diselesaikan secara simultan untuk mendapatkan C_V = 2.800 lb, dan C_H = –5.600 lb. Nilai negatif untuk C_H menunjukkan pada kita bahwa kedua bagian struktur tidak saling menarik secara horisontal satu dengan yang lainnya, kedua bagian struktur tersebut saling mendorong lateral satu dengan yang lainnya. Dengan mensubstitusikan kedua nilai ini (dengan mempertahankan tanda negatif pada C_H), kita menemukan bahwa L_V = 14.000 lb, L_H = 5.600 lb, R_V = 14.000 lb, dan R_H = –5.600 lb. Kita melihat bahwa R_H tidak menarik pada bagian struktur sebelah kanan, tetapi mendorong terhadap



GAMBAR 3.14

bagian struktur untuk mengekang daya dorong (*thrust*) ke arah luar, serupa dengan reaksi dari L_H.

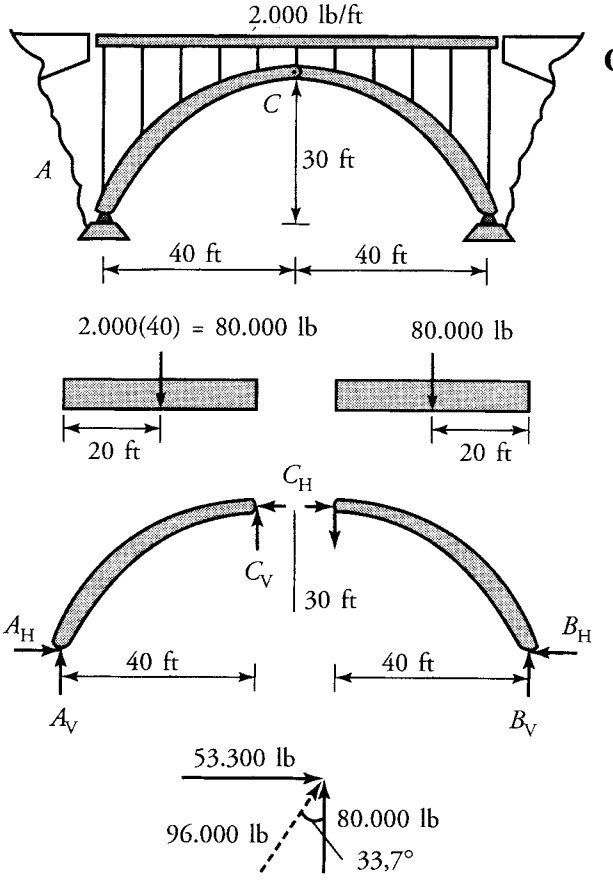
Kita akan sering melihat struktur rangka dengan sambungan-sambungan yang bukan merupakan sambungan engsel, terutama untuk rangka beton yang dicor di tempat dan juga untuk rangka baja. Apabila bagian-bagian struktur rangka secara kaku disambungkan satu dengan yang lain (artinya, bagian-bagian struktur tersebut mentransfer momen-momen pada titik kumpul-titik kumpul sambungan), maka struktur tersebut disebut sebagai struktur *rangka kaku*, dan biasanya merupakan sebuah struktur tak tentu. Rangka-rangka kaku, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.14, memerlukan analisis komputer; apabila tidak, dibutuhkan asumsi-asumsi yang disederhanakan sebagai penyesuaian untuk analisis dengan perhitungan tangan (artinya, membuat struktur tersebut menjadi struktur tentu).

Apabila kita dapat mengidentifikasi titik-titik di sepanjang bagian struktur rangka di mana momen-momen internal adalah nol, sebuah sendi yang fiktif dapat diasumsikan menyambungkan dua anggota struktur yang terpisah pada titik tersebut. Titik-titik seperti itu ditunjukkan pada rangka-rangka kaku seperti yang terlihat pada gambar. Lokasi "sendi" dari sebuah struktur seperti itu bervariasi untuk beban-beban yang berbeda seperti yang terlihat pada gambar untuk dua buah kerangka dua kaki (*bent*) yang dibebani. Untuk rangka-rangka kaku yang lebih kompleks, asumsi-asumsi tambahan mengenai distribusi beban mungkin juga diperlukan. Sebelum tersedianya alat bantu komputer yang dapat menganalisis rangka-rangka tak tentu, hanya metode-metode pendekatan analisis rangka sajalah yang dapat digunakan untuk mendesain kebanyakan megastruktur yang kompleks dan megah.

3.9 Lengkungan Radial Tiga-sendi

Gambar 3.15 memperlihatkan sebuah lengkungan radial dengan tiga sendi, yang dinamakan demikian karena bentuk dari struktur dengan dua-bagian struktur tersebut berupa sebuah lengkungan dengan radius sebesar 42 ft, yang disendi pada kedua tumpuan eksternalnya dengan sendi ketiga yang menyambungkan kedua bagian struktur di puncak lengkungan. Rangka-rangka seperti ini umumnya digunakan untuk membentuk kubah lingkaran serta bangunan-bangunan lengkungan silindris, dan pada kasus ini, sebuah jembatan lengkung.

Struktur jembatan ini terdiri dari empat lengkungan terpisah dengan jarak 18 ft, masing-masing menahan sebuah dek jalan raya yang memiliki beban mati uniform (termasuk berat lengkungan itu sendiri) ditambah beban hidup yang tersebar secara merata sebesar 2.000 plf. Seperti yang terlihat pada gambar, beban horisontal ini disalurkan ke lengkungan melalui kolom-kolom vertikal yang terpisah masing-masing dengan jarak 8 ft dan menyalurkan beban-beban vertikal yang sama ke lengkungan yang menahan. Pada contoh ini, atau pada semua tempat di mana empat



GAMBAR 3.15

atau lebih beban terkonsentrasi secara uniform dengan jarak yang sama bekerja pada satu elemen struktur, adalah layak untuk mengasumsikan bahwa elemen struktur tersebut dibebani secara uniform.

Kita ingin mengetahui komponen-komponen reaksi eksternal pada tumpuan *A* dan tumpuan *B*. Karena terdapat empat reaksi tumpuan—dua per sendi—kita tidak dapat dengan mudah menentukan reaksi-reaksi tersebut dengan menerapkan ketiga persamaan kesetimbangan untuk struktur sepanjang 80 ft tersebut secara keseluruhan. Namun demikian, dengan memisahkannya di sendi *C*, terlihat bahwa kita memiliki total enam anu yang tak diketahui (dua per sendi) dan tiga persamaan kesetimbangan untuk tiap-tiap anu kedua bagian struktur yang terpisah—enam persamaan dan enam anu yang tak diketahui. Perhatikan bahwa kedua komponen gaya di engsel *C* harus diasumsikan sama dan melawan pada bagian-bagian struktur sebelah kiri serta bagian-bagian struktur sebelah kanan.

Dengan menjumlahkan momen-momen di *A* dan *B* secara berturut-turut, kita mendapatkan dua persamaan berikut ini, dengan dua komponen yang tak diketahui dari gaya pada sendi *C*:

$$80.000(20) - C_H(30) - C_V(40) = 0$$

$$-80.000(20) + C_H(30) - C_V(40) = 0$$

Dari persamaan-persamaan tersebut, $C_H = 53.300$ lb, dan $C_V = 0$. Dengan menjumlahkan gaya-gaya vertikal pada setiap elemen struktur lengkungan, maka kita dapat melihat bahwa $A_V = B_V = 80.000$ lb, dan penjumlahan dari gaya-gaya horisontal pada kedua anggota struktur menunjukkan bahwa desakan dari bagian-bagian struktur lengkungan ke arah luar, yang disebut daya dorong horisontal, adalah

$$A_H = B_H = C_H = 53.300 \text{ lb}$$

Jadi, gaya yang diimbangi oleh reaksi pondasi yang menahan jembatan lengkung tersebut menjadi

$$F = \sqrt{(80.000^2 + 53.300^2)} = 96.100 \text{ lb}$$

Gaya ini menghasilkan sebuah sudut dengan sebuah sumbu vertikal sebesar

$$z = \arctan\left(\frac{53.300}{80.000}\right) = 33{,}7°$$

Sebenarnya kita dapat menentukan dengan cepat komponen-komponen reaksi lengkungan dengan menerapkan persamaan-persamaan lengkungan sederhana yang dibahas pada bab terakhir dari buku ini.

Karena lengkungan dibebani merata, komponen vertikal dari reaksi di A akan menjadi $V = wL/2 = 2.000(80)/2 = 80.000$ lb. Komponen horisontal akan menjadi $H = wL^2/8s = 2.000(80^2)/(8 \times 30) = 53.300$ lb.

Latihan Kerjakan kembali soal ini dengan bagian struktur AC dan bagian struktur BC memiliki bentuk yang lurus, sehingga lengkungan radial tersebut menjadi sebuah struktur rangka berbentuk-A yang dibebani merata.

Kerjakan kembali soal mengenai lengkungan ini dengan menempatkan beban hidup hanya pada satu sisi dari struktur, sehingga beban merata pada bentang horisontal sepanjang 40 ft dari anggota struktur CB adalah 1.000 plf, alih-alih 2.000 plf. ■

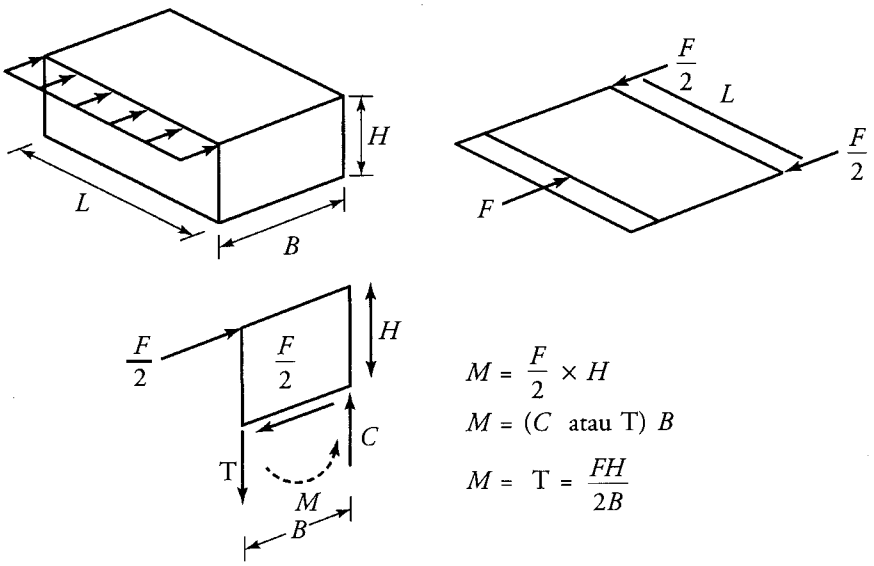
3.10 Struktur Diafragma

Struktur diafragma merupakan susunan dari elemen-elemen struktur berbentuk mirip pelat yang bekerja seperti balok-balok tipis dalam, untuk menahan beban-beban lateral. Pelat-pelat penahan beban ini disebut diafragma. Dengan penggunaan diafragma, sebuah kerangka kerja tidak digunakan untuk memikul beban-beban; namun, kulit struktur—atap, lantai, dan dinding—didesain untuk menyalurkan angin horisontal atau beban-beban gempa menuju pondasi. Bahkan pada struktur yang menggunakan rangka untuk menahan beban, elemen struktur atap yang besar dan elemen struktur lantai yang besar seringkali diperlakukan sebagai diafragma penahan-beban yang mentransfer gaya-gaya lateral ke bagian-bagian struktur rangka.

Gambar 3.16 memperlihatkan sebuah struktur diafragma dasar. Dalam batas tertentu, struktur seperti ini bisa saja mengingatkan kita akan sebuah "rumah yang dibuat dari kartu", namun pemikiran seperti ini tidaklah tepat untuk sebuah struktur diafragma yang didesain dengan baik dan mampu menahan gaya-gaya lateral yang sangat besar. Pada gambar, kita melihat bahwa atap dari bangunan tersebut adalah sebuah balok tipis dalam yang dibebani secara uniform, yang membentang sepanjang jarak kedua dinding ujung bangunan.

Diafragma atap dibebani secara lateral dengan beban merata yang bekerja di sepanjang atap dan bekerja pada bidang dari atap. Beban bisa saja diakibatkan oleh terpaan angin terhadap dinding panjang yang terpasang dengan atap, atau bisa juga diakibatkan oleh reaksi inersial (ketahanan terhadap gerakan) dari massa atap terhadap sebuah gerakan lateral mendadak yang diakibatkan oleh gempa bumi. Pada segala kasus,

GAMBAR 3.16



diafragma atap ditahan dalam kesetimbangan oleh reaksi dari kedua diafragma dinding ujung. Beban lateral yang disalurkan ke dinding-dinding ujung kemudian ditahan dalam kesetimbangan oleh pondasi yang bereaksi dengan sebuah gaya melawan dan sebuah kopel. Diafragma-diafragma dinding ujung disebut dinding geser karena efek tegangan (*racking*) dari gaya-gaya geser bawah, dan gaya-gaya geser puncak yang melawan adalah beban kritis pada elemen-elemen struktur ini.

Dinding-dinding geser bekerja seperti balok-balok kantilever yang dijepit ke dalam tanah. Reaksi-reaksi ujung yang dijepit adalah gaya geser horisontal, $F/2$, dan kopel momen, M, yang terbentuk secara berurutan oleh gaya-gaya tarik vertikal, T, dan gaya-gaya tekan vertikal, C. Pada bagian atas dari ujung yang bebas, balok-balok kantilever dibebani dengan sebuah gaya terpusat yang sama dengan tekanan (*shove*) lateral dari diafragma atap, juga $F/2$.

Sebagai contoh, katakanlah bangunan pada gambar tersebut memiliki dimensi-dimensi L = 30 ft, B = 12 ft, dan H = 8 ft. Sebuah beban angin lateral sebesar 120 lb diterapkan sepanjang 30 ft dari tepi atap. Berapakah besar gaya pada sebuah sambungan batang ikat yang menahan terangkatnya dinding-dinding geser ujung? Kita mencari T, yang diakibatkan oleh sebuah gaya lateral total yang bekerja pada bidang atap, $F = 120 \times L = 3.600$ lb, dan

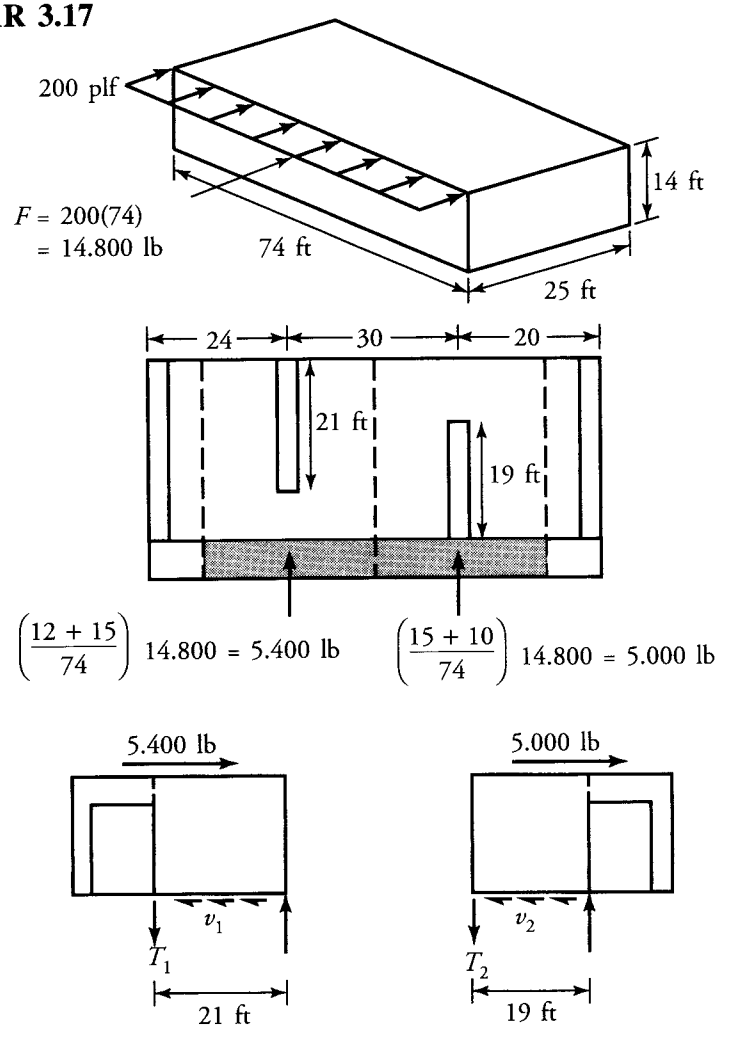
$$T = \frac{F \times H}{2B} = \frac{3.600 \times 8}{2 \times 12} = 1.200 \text{ lb}$$

Jadi, beban-beban lateral dapat menyebabkan gaya-gaya mengangkat yang cukup besar, bahkan pada sebuah struktur yang berukuran sedang.

3.11 Dinding Geser Interior

Pada Gambar 3.17, kita lihat sebuah struktur diafragma sederhana dengan dinding-dinding geser interior dan dinding-dinding geser eksterior. Beban lateral sebesar 200 plf yang bekerja di sepanjang garis atap dengan panjang 74 ft, melambangkan gaya inersial yang dihasilkan oleh massa atap dan massa dinding akibat sebuah gempa bumi yang menyebabkan getaran tanah dalam arah 25 ft dari bangunan. Kedua dinding geser eksterior dengan panjang yang penuh dan kedua dinding interior dengan bukaan

GAMBAR 3.17



(*opening*) masing-masing harus menahan bagian-bagiannya dari pembebanan gempa lateral ini. Garis putus-putus pada denah menandakan porsi pembebanan beban dari masing-masing dinding. Kita melihat bahwa tiap-tiap dinding eksterior memikul porsi yang lebih kecil dari beban lateral sebesar 14.800 lb apabila dibandingkan dengan dinding interior sepanjang 21 ft yang memikul 5.400 lb, dan dinding interior sepanjang 19 ft, yang memikul 5.000 lb.

Standar perancangan bangunan menetapkan kuat geser satuan yang diizinkan untuk berbagai jenis konstruksi diafragma. Geser satuan adalah gaya geser total pada dinding dibagi panjang dinding. Standar perancangan bangunan tersebut juga menetapkan gaya tarik yang diizinkan, yang dapat ditahan oleh berbagai jenis kunci pengikat. Apabila dinding-dinding geser pada gambar ditentukan memiliki taraf kapasitas geser satuan sebesar 275 plf, dan baut-baut pengikatnya memiliki kapasitas geser satuan sebesar 5.000 lb, apakah dinding-dinding interior cukup memadai untuk menahan gaya gempa bumi?

Untuk dinding geser interior sepanjang 21 ft, geser satuannya adalah

$$v_1 = \frac{5.400}{21} = 257 \text{ plf} < 275 \text{ plf}, \qquad \text{OKE}$$

Gaya ikat (*tie-down force*) yang diperlukan untuk menahan dinding pada tempatnya, ditentukan dengan menjumlahkan momen-momen pada pojok-pojok yang berlawanan dari dinding tersebut

$$5.400(14) - T_1(21) = 0$$

$$T_1 = 3.600 \text{ lb} < 5.000 \text{ lb}, \qquad \text{OKE}$$

Untuk dinding geser interior sepanjang 19 ft, geser satuannya adalah

$$v_2 = \frac{5.000}{19} = 263 \text{ plf} < 275 \text{ plf, OKE}$$

Gaya ikat menjadi

$$5.000(14) - T_2(19) = 0$$

$$T_2 = 3.680 \text{ lb} < 5.000 \text{ lb}, \quad \text{OKE}$$

Latihan

Tambahkan tingkat kedua pada struktur ini dan periksalah kembali dinding-dinding geser interior dari lantai pertama. Asumsikan bahwa dinding-dinding tersebut diperkuat untuk menahan sebuah geser satuan sebesar 500 plf. ■

4 TEGANGAN DAN DEFORMASI PADA STRUKTUR

4.1 TEGANGAN, REGANGAN, DAN DEFORMASI

Seperti yang telah kita lihat, kita menyambungkan bagian-bagian struktur dan/atau subsusunan struktur pada sistem struktur agar secara aman dapat menahan beban-beban lateral dan vertikal yang diakibatkan oleh gaya-gaya alam. Tiap-tiap elemen struktur dari sistem struktur tersebut biasanya berasal dari bahan bangunan yang umum; seperti beton, baja, atau kayu, dan dibentuk menjadi bagian struktur dengan berbagai panjang dan ukuran penampang melintang. Dalam teknologi struktur, *tegangan* didefinisikan sebagai intensitas dari gaya yang bekerja di dalam bahan dari sebuah bagian struktur. Tegangan adalah perbandingan atau rasio dari gaya terhadap daerah di mana gaya tersebut bekerja, sehingga

$$\text{tegangan} = \frac{\text{gaya}}{\text{luas}}$$

Sebuah gaya yang secara longitudinal melakukan tarik di tiap-tiap ujung dari panjang sebuah kawat baja tipis akan menghasilkan tegangan tarik yang lebih besar pada baja dibanding apabila gaya yang sama diterapkan pada sebuah batang baja padat dengan panjang yang sama dengan kawat baja tersebut. Ini disebabkan karena penampang kawat lebih kecil daripada penampang batang, sehingga intensitas dari kedua gaya—gaya per luas satuan—lebih besar pada kawat. Apabila gaya ini sedikit demi sedikit bertambah pada kedua elemen struktur tersebut, maka tegangan-tegangan pada kedua bagian struktur tersebut akan bertambah sebanding dengan pertambahan gaya, di mana kawat baja tipis yang menghasilkan tegangan yang lebih tinggi akan menjadi bagian struktur pertama yang akan mencapai sebuah titik tegangan yang berlebihan, dan kemudian runtuh.

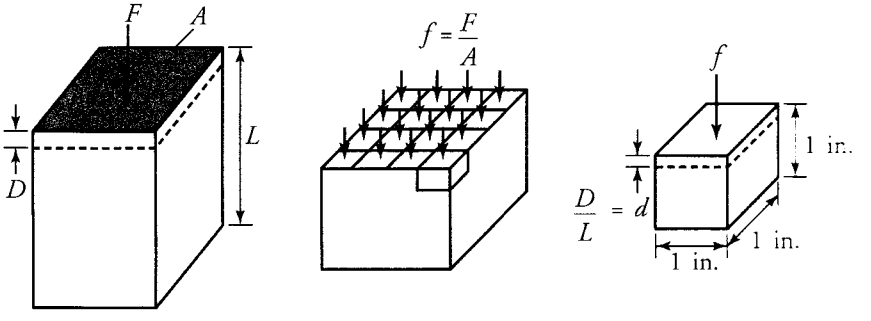
Deformasi adalah perubahan dimensi secara keseluruhan, yang terjadi sebuah bagian struktur yang mengalami tegangan. *Regangan* adalah tara dari deformasi ini, atau deformasi per panjang dari bagian struktur:

$$\text{regangan} = \frac{\text{deformasi}}{\text{panjang anggota struktur}}$$

Pada Gambar 4.1, kita melihat sebuah bagian struktur yang pendek, dengan panjang L dan daerah penampang melintang A, mengalami tekan di antara dua pelat kaku akibat gaya aksial, F. Pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa ketika gaya aksial tekan bertambah, maka deformasi D dari bagian struktur juga bertambah. Tegangan aksial pada bahan bagian struktur adalah $f = F/A$. Tegangan ini terlihat bekerja tegak lurus terhadap penampang melintang dari sebuah bagian struktur, dan tegangan tersebut merupakan tegangan merata apabila gaya aksial merupakan gaya yang sentris. (Gaya-gaya aksial umumnya sentris, yang menunjukkan secara tidak langsung bahwa garis gaya aksi melalui titik berat dari setiap penampang melintang bagian struktur–kita nantinya akan membahas hal ini secara lebih detail). Regangan merata yang dihasilkan dari tegangan merata adalah $d = D/L$.

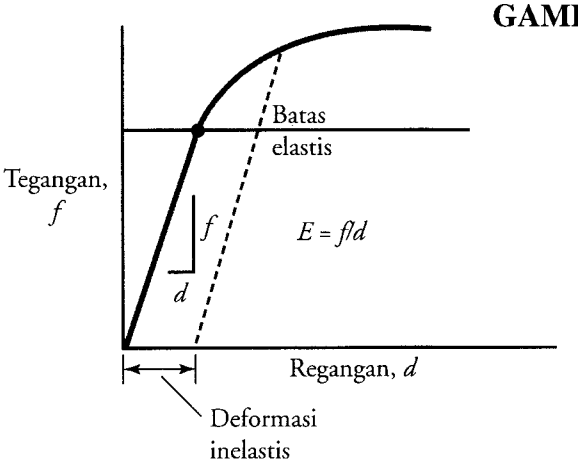
Untuk bagian struktur dengan panjang L, kita meninjau sebuah kubus dari bahan yang mengalami tegangan dengan dimensi-dimensi satuan, 1 in. × 1 in. × 1 in. Tegangan aksial pada bagian struktur, f, adalah sebuah gaya kecil yang bekerja pada luas penampang melintang satuan seluas 1 in^2., dan regangan dari bagian struktur, d, sebenarnya merupakan deformasi satuan dari kubus dengan panjang satuan 1 in. Jadi, tegangan dan regangan masing-masing adalah gaya satuan dan deformasi satuan dari sebuah bagian struktur yang dibebani. Tegangan dinyatakan sebagai gaya per luas, biasanya dalam pound per inci persegi atau psi, sedangkan regangan tidak memiliki dimensi, karena regangan merupakan rasio dari deformasi terhadap panjang bagian struktur, biasanya dinyatakan dalam inci per inci atau in./in.

Grafik yang diperlihatkan pada Gambar 4.2 merupakan plot yang umum dari jenis data yang akan diperoleh dari sebuah spesimen, seperti yang terlihat pada Gambar 4.1. Sebuah beban yang terukur sedikit demi sedikit diterapkan pada sebuah bagian struktur (tegangan yang ditimbulkan = gaya per luas penampang melintang dari bagian struktur), sementara pada saat yang sama, deformasi total diukur (dari deformasi, regangan dihitung sebagai deformasi per panjang bagian struktur awal).



GAMBAR 4.1

GAMBAR 4.2



Plot dari tegangan versus regangan menghasilkan sebuah grafik yang dikenal dengan nama kurva tegangan-regangan untuk bahan spesifik yang diuji. Dengan membagi gaya dengan luas penampang bagian struktur dan membagi deformasi dengan panjang bagian struktur, kita mendapatkan gaya satuan serta deformasi satuan, sehingga pengaruh dari ukuran bagian struktur tereliminasi, dan kemudian kita dapat memusatkan perhatian hanya pada karakteristik-karakteristik dari bahan bagian struktur. Sebuah kurva yang unik akan didapatkan untuk tiap-tiap bahan struktur yang berbeda.

Pada awalnya, sebelum tegangan yang diterapkan mencapai tingkatan yang disebut batas elastis, beban bisa saja telah dihilangkan dan tegangan serta semua regangan akan menghilang—hal ini diistilahkan sebagai *pembebanan elastis*. Bagian awal yang menuju ke atas batas elastis merupakan sebuah garis. Kemiringan dari garis ini merupakan rasio dari tegangan terhadap regangan, yang unik untuk tiap-tiap bahan, dan rasio ini disebut modulus elastisitas, E:

$$\text{Modulus elastisitas} = \frac{\text{tegangan}}{\text{regangan}}$$

Sebagaimana yang tersirat dari namanya, E adalah ukuran kekakuan elastis bahan. Untuk bahan-bahan bangunan yang umumnya paling sering digunakan, nilai-nilai praktis E untuk kayu, beton, dan baja masing-masing adalah 1.600.000 psi, 3.500.000 psi, dan 30.000.000 psi.

Apabila sebuah gaya menimbulkan tegangan yang *melebihi* batas elastis pada bahan dari sebuah bagian struktur, maka penghilangan gaya sedikit demi sedikit akan mengakibatkan tegangan dan regangan terkait yang mengikuti garis putus-putus menurun menjadi tegangan sebesar nol, dan beberapa regangan yang tidak dapat dipulihkan akan timbul. Bagian struktur

tersebut kemudian dapat dinyatakan telah *diberi tegangan secara inelastis.* Pembebanan elastis dan pemindahan beban elastis lebih lanjut dari sebuah bahan yang telah diberi tegangan secara inelastis akan mengikuti garis putus-putus, seperti yang terlihat pada gambar. Kemiringan dari garis putus-putus tetap merupakan E, yang berarti bahwa bahan tersebut mempertahankan kekakuan elastisnya. Pembebanan secara inelastis pada struktur umumnya tidak diinginkan, karena menghasilkan sebuah struktur yang akan mengalami deformasi secara permanen.

Ketika kurva tegangan-regangan untuk sebuah bahan memanjang jauh melebihi batas elastis, kita menyatakan bahwa bahan tersebut adalah bahan yang daktil. Baja merupakan sebuah bahan yang sangat daktil. Sebagai contoh, baja struktur yang umum digunakan memiliki batas elastis (umumnya disebut kuat leleh baja), f = 36.000 psi pada sebuah regangan elastis sebesar

$$d = \frac{f}{E} = \frac{36.000}{30.000.000} = 0{,}0012 \text{ in./in.}$$

Regangan inelastis yang dapat ditahan oleh baja melebihi 100 kali regangan elastisnya. Beton dapat dianggap daktil dalam keadaan tekan, tetapi rapuh (cukup lemah) dalam kondisi tarik. Kayu bukan merupakan bahan yang daktil, karena kurva tegangan-regangannya sebagian besar merupakan kurva linear.

Dalam proses desain, kita akan melihat bahwa tegangan-tegangan bahan pada berbagai jenis struktur dipertahankan dengan baik di bawah batas elastis untuk memastikan terbangunnya struktur-struktur yang aman dan fungsional, yang merespons semua beban secara elastis. Untuk menganalisis dan mendesain bagian-bagian struktur, hubungan yang cukup berguna berikut ini dapat diperoleh dari definisi mengenai tegangan dan regangan:

$$D = \frac{F \times L}{A \times E} = \frac{f \times L}{E}$$

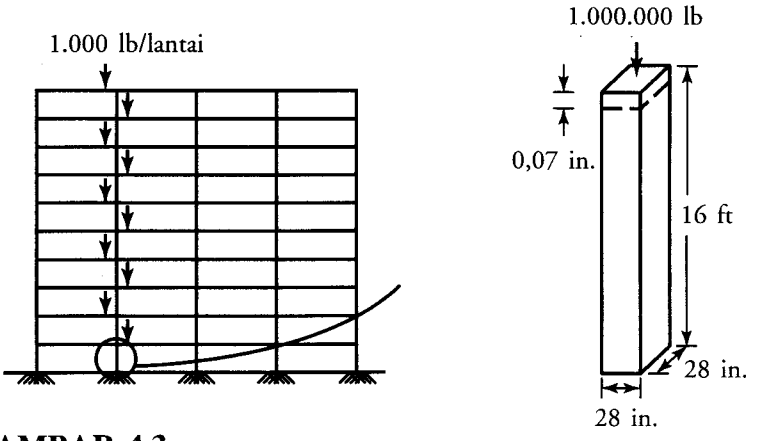
Kita dapat menghitung deformasi dari sebuah gaya (atau sebuah tegangan) aksial yang diketahui pada sebuah bagian struktur. Hubungan tersebut juga menunjukkan bahwa deformasi aksial bervariasi secara langsung dengan gaya (atau tegangan) dan panjang bagian struktur, serta bervariasi secara terbalik dengan ukuran penampang dan kekakuan bahan.

Sebuah ilustrasi dari hubungan-hubungan ini akan sangat membantu. Pada Gambar 4.3, beban pada sebuah kolom lantai-dasar berukuran 28 in. × 28 in. dari sebuah gedung bertingkat-10 diperlihatkan menjadi sebesar

$$F = 10 \times 100.000 = 1.000.000 \text{ lb}$$

Kolom beton dengan tinggi 16 ft (192 in.) memiliki luas penampang melintang seluas

$$A = 28 \times 28 = 784 \text{ in}^2$$



GAMBAR 4.3

Dengan mengetahui bahwa modulus elastisitas beton E = 3.500.000 psi, kita melihat bahwa kolom akan menjadi lebih pendek sepanjang

$$D = \frac{1.000.000 \times 192}{784 \times 3.500.000} = 0{,}07 \text{ in.}$$

Anda mungkin berasumsi apabila bangunan tersebut memiliki 20 tingkat, maka kolom lantai bawah juga akan menjadi dua kali lebih pendek, karena beban kolom juga menjadi dua kali lipat dengan 10 tingkat lebih banyak, dan persoalannya akan menjadi lebih problematis untuk bangunan bertingkat 100. Ini sebenarnya akan terjadi, kalau kita tidak mengubah penampang melintang dari kolom-kolom pada tingkat yang lebih rendah untuk struktur-struktur yang lebih tinggi. Apabila kita tidak membuat area-area kolom yang lebih besar untuk penambahan tingkat-tingkat di atasnya, maka tegangan tambahan akibat beban ekstra per lantai akan menjadi berlebihan dan akan menghancurkan beton pada kolom-kolom tersebut.

Tegangan pada kolom dari struktur bertingkat-10 tersebut adalah

$$f = \frac{F}{A} = \frac{1.000.000}{784} = 1.280 \text{ psi}$$

Tegangan tersebut kira-kira sebesar tingkatan tegangan yang masih bisa diizinkan pada kolom-kolom beton. Untuk mempertahankan tingkatan tegangan yang sama untuk bangunan bertingkat-20, kita memerlukan sebuah luas penampang melintang yang akan menghasilkan tegangan yang sama. Karena $f = F/A$, kita mendapatkan $A = F/f$, sehingga

$$A = \frac{2.000.000}{1.280} = 1.560 \text{ in}^2$$

Bukanlah suatu hal yang mengherankan apabila penampang melintang

kolom lantai dasar untuk bangunan yang lebih tinggi harus dua kali lebih besar. Dimensi-dimensi penampang melintang kolom harus menjadi $\sqrt{1.560}$, sehingga diperlukan kolom berukuran 40 in. × 40 in.

Dari rumus deformasi, karena tegangannya sama pada kedua kasus tersebut, maka lantai dasar dari kedua bangunan harus menjadi lebih pendek dengan ukuran yang sama:

$$D = \frac{1.280 \times 192}{3.500.000} = 0{,}07 \text{ in.}$$

Lebih lanjut, apabila kita mempertahankan tegangan yang sama pada kolom-kolom di setiap tingkatan lantai dengan membedakan penampang kolom pada tiap-tiap tingkat lantai dari tiap-tiap bangunan, maka tiap lantai dari tiap bangunan akan menjadi lebih pendek 0,07 in., dan secara keseluruhan, bangunan bertingkat-10 akan menjadi 10 × 0,07 = 0,7 in. lebih pendek, serta bangunan bertingkat-20 akan menjadi 1,4 in. lebih pendek.

Mungkin kita ingin membandingkan beton dengan alternatif dari bahan baja berdasarkan sebuah deformasi tingkat yang umum $D = 0{,}07$ in. Karena $D = (f \times L)/E$, kita akan memerlukan baja tersebut untuk menahan sebuah tegangan sebesar

$$f = \frac{D \times E}{L} = \frac{0{,}07 \times 30.000.000}{192} = 11.000 \text{ psi}$$

Nilai ini merupakan sebuah nilai yang layak untuk tegangan desain dari sebuah kolom baja. Luas penampang melintang baja yang diperlukan adalah

$$A = \frac{2.000.000}{11.000} = 182 \text{ in}^2$$

Dengan definisi-definisi dasar dari tegangan, regangan, dan kekakuan elastis dari bahan, serta pemahaman mengenai hubungan-hubungannya dengan gaya, luas penampang, dan panjang dari bagian-bagian struktur, kita dapat melanjutkan penyelidikan kita mengenai beberapa penerapan sederhana dari prinsip-prinsip ini.

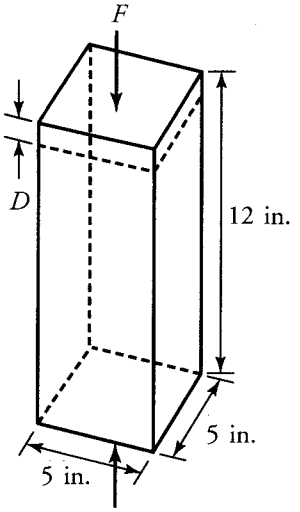
4.2 Menentukan Modulus Elastisitas Kayu

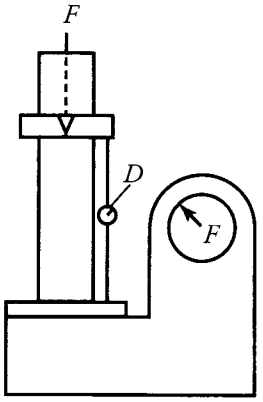
Sebelum digantikan oleh sebuah jembatan baru yang lebih lebar, sebuah jembatan kayu tua yang gambar konstruksinya tidak lagi tersedia diberi beban sampai runtuh dalam proyek riset sebuah universitas. Untuk menganalisis data beban-deformasi yang dikumpulkan selama pengujian

di lapangan oleh para peneliti, modulus elastisitas E dari jenis kayu yang tak diketahui harus ditentukan terlebih dahulu.

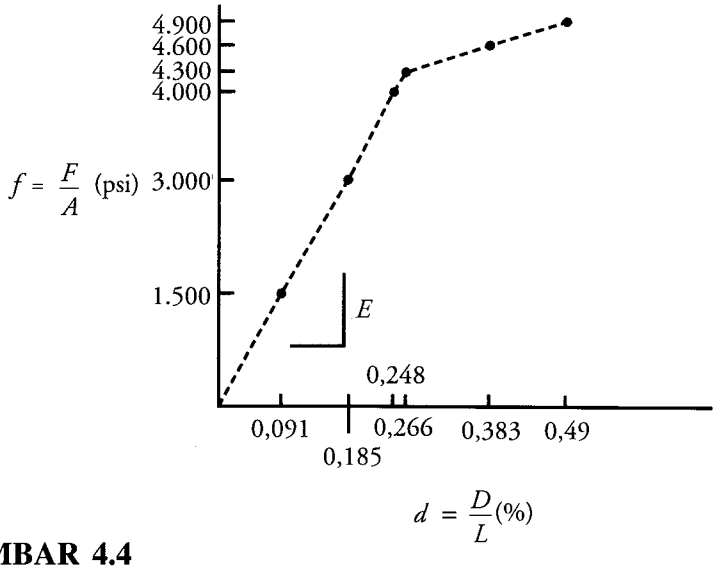
Teknisi di laboratorium pengujian bahan menggunakan mesin pengujian tekanan beton untuk mendapatkan hubungan tegangan-regangan bahan, karena kayu dalam keadaan tekan memiliki kekuatan gagal yang serupa dengan beton berkekuatan normal. Sampel kayu berukuran 5 in. × 5 in. × 12 in. dipotong dari balok jembatan yang besar, karena dimensi tersebut serupa dengan silinder pengujian beton standar dengan diameter 6 in. dan tinggi 12 in.

Sebuah sketsa dari sampel pengujian diperlihatkan pada Gambar 4.4 disertai dengan sebuah sketsa dari mesin beban. Sebuah alat pengukur





F	D
0	0
37,5 k	0,011
75 k	0,022
100 k	0,029
108 k	0,032
115 k	0,045
123 k	0,059



GAMBAR 4.4

dengan penunjuk yang besar memperlihatkan berapa beban yang menekan F, pada contoh yang diletakkan pada dongkrak pembebanan hidrolik. Tiap kali sebuah pembacaan (*reading*) F dilakukan, deformasi pemendekan yang terkait D, juga dibaca dari sebuah alat pengukur kecil deformasi yang disebut ekstensometer. Bacaan-bacaan beban dan deformasi dari pengujian sebuah contoh diperlihatkan pada gambar. Nilai-nilai F dan D ini dikonversikan ke tegangan yang terkait, f, dan regangan yang terkait, d, dinilai dengan membaginya secara berturut-turut dengan luas penampang melintang dari spesimen, $A = 25$ in^2, dan panjang total $L = 12$ in. Plot untuk data tegangan-regangan diperlihatkan pada gambar.

Kekakuan elastis bahan, atau modulus elastisitas, E, adalah kemiringan dari bagian lurus awal dari data yang telah diplot. Kita melihat bahwa tegangan tertinggi pada bahan yang diikuti oleh hubungan tegangan-regangan pada sebuah garis lurus adalah sekitar 4.300 psi. Ini merupakan batas elastis, di luar dari sebuah hubungan nonlinier yang ada di antara tegangan dan regangan sehingga pada kasus ini, spesimen bahan tersebut hancur oleh sebuah tegangan tekan batas sebesar 4.900 psi.

E dapat ditentukan dari perbandingan atau rasio tegangan batas elastis, $f = 4.300$ psi, terhadap regangan yang terkait, $d = 0{,}00266$ in./in., jadi

$$E = \frac{f}{d} = \frac{4.300}{0{,}00266} = 1.620.000 \text{ psi}$$

Kita akan melihat bahwa selain deformasi dan tegangan aksial, E juga merupakan suatu hal yang penting dalam studi mengenai balok dan kolom.

Latihan

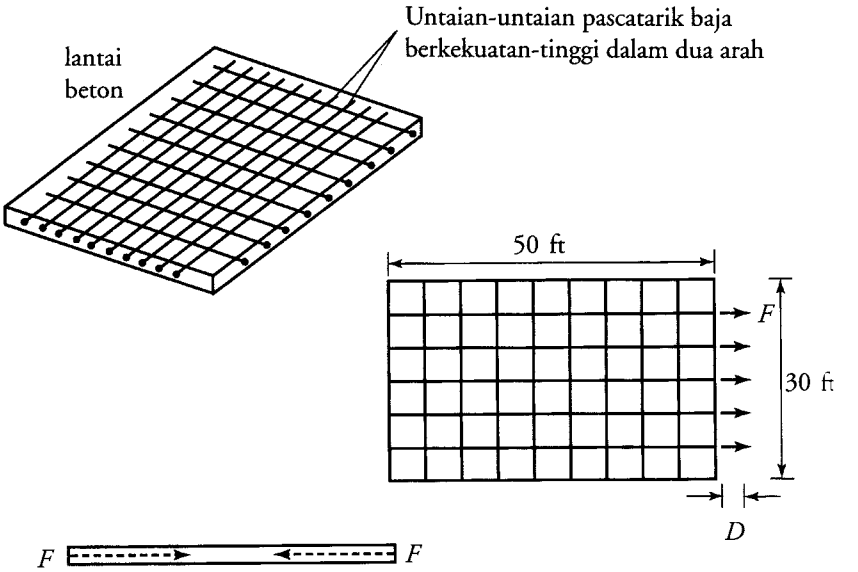
Sebuah perpanjangan diukur 0,012 in. pada sebuah elemen struktur dengan panjang 2 ft yang secara elastis diberi tegangan sebesar 5.000 psi dalam tarik. Berapakah modulus elastisitas dari bahan tersebut?

Berapakah lentur yang terjadi pada sebuah bagian struktur sepanjang 30 ft dari bahan ini apabila luas penampang melintangnya adalah seluas 4 in^2, dan bagian struktur tersebut menumpu sebuah beban aksial sebesar 12.000 lb?

4.3 Lantai Pascatarik

Untuk mencegah terbentuknya retak-retak yang berlebihan pada lantai-lantai beton, terutama apabila ubin-ubin keramik yang mahal dilekatkan ke lantai sebagai finis untuk penutup lantai interior, maka lantai dapat diberi pascatarik, seperti yang digambarkan pada Gambar 4.5. Pemberian pascatarik secara efektif menekan lantai sedemikian rupa sehingga retak-

GAMBAR 4.5



Gaya tarik F disalurkan ke lantai sebagai sebuah beban dalam tekan

retak akibat susut dan retak-retak akibat tarik yang biasanya rutin terjadi pada komponen-komponen struktur seperti ini dapat dikurangi.

Selama proses pencetakan lantai, untaian-untaian baja paralel berkekuatan tinggi dengan diameter $\frac{1}{2}$ in. yang dimasukkan ke dalam bahan pelapis plastis diregangkan melewati panjang dari papan pencetak lantai. Suatu perangkat keras untuk pengangkuran digunakan untuk menahan satu ujung dari untaian sehingga memungkinkan ujung yang lainnya diregangkan. Kemudian beton dituangkan ke papan pencetak lantai dan dibiarkan mengering.

Pada ujung untaian yang tidak diangkur, sebuah alat khusus digunakan untuk meregangkan untaian keluar dari lantai dengan mendongkraknya ke luar dan suatu perangkat keras dijepitkan pada ujung yang bebas dari tiap-tiap untaian. Untaian-untaian yang tertarik tersebut kemudian dilepaskan agar dengan cepat menekan pada ujung lantai dan menekannya pada saat kabel bekerja untuk menarik kedua ujung yang diangkur secara bersamaan. Untaian bebas meregang di bagian panjangnya karena untaian tersebut terbungkus dalam sebuah tabung plastis dan tidak melekat dengan beton yang telah mengeras.

Pabrik pembuat perangkat keras khusus yang digunakan dalam operasi ini merekomendasikan agar untaian harus secara aman diberi tegangan hingga $f = 80.000$ psi, dalam tarik. Untuk sebuah arah yang panjang dari

sebuah lantai berukuran 50 ft × 30 ft, berapakah untaian-untaian akan diregangkan, dan berapakah gaya regang yang dihasilkan?

Karena tegangan adalah gaya per luas satuan, gaya regang adalah sebesar

$$F = f \times A = 80.000 \times \pi \left(\frac{1}{2} \times 0{,}5\right)^2 = 15.700 \text{ lb}$$

Berapakah peregangan yang diperlukan untuk kabel-kabel yang diorientasikan dalam arah 30 ft?

Latihan

Kerjakan kembali soal tersebut dengan mengasumsikan bahwa untaian-untaian plastis yang diperkuat dengan fiberglass (bukan baja) yang diberikan tegangan sebesar 10.000 psi digunakan. Modulus elastisitas dari komposit ini adalah E = 2.500.000 psi.

Apabila petunjuk praktisnya adalah menegangkan kabel-kabel sepanjang 1 in. untuk setiap panjang 12 ft dari kabel, berapakah tegangan dan regangan pada baja?

Peregangan untaian yang diperlukan untuk menghasilkan sebuah tegangan sebesar 80.000 psi adalah

$$D = \frac{F \times L}{A \times E} = \frac{f \times L}{E} = \frac{80.000 \times 50 \times 12}{30.000.000} = 1{,}6 \text{ in.}$$

4.4 Tegangan dan Deformasi Akibat Perubahan Suhu

Ketika suhu mengalami kenaikan atau penurunan, bahan-bahan bangunan mengalami ekspansi atau mengalami kontraksi. Apabila bagian-bagian struktur bebas untuk memuai, seperti sebuah balok sederhana dengan tumpuan rol pada satu ujungnya, maka tidak akan terjadi perubahan yang signifikan akibat perubahan suhu. Apabila balok disendi atau dijepit pada kedua ujungnya, perubahan suhu dapat menghasilkan perubahan-perubahan yang serius, terutama untuk struktur-struktur beton dan struktur-struktur baja yang masif.

Sebuah besaran bahan yang disebut *koefisien pemuaian panas*, c, adalah deformasi (regangan) satuan yang dialami oleh bahan untuk perubahan suhu sebesar 1°. Untuk baja dan beton, koefisien c ini kira-kira = 0,000006 in./in./°F. Sebagai contoh, deformasi satuan pada sebuah balok baja akibat kenaikan suhu sebesar 25°F adalah

$$d = 25 \times 0{,}000006 = 0{,}00015 \text{ in./in.}$$

Misalkan sebuah balok utama jembatan sepanjang 150 ft (1.800 in.) mengalami kenaikan suhu sebesar 25°F. Balok tersebut akan memuai sepanjang

$$D = d \times L = 0{,}00015 \times 1.800 = 0{,}27 \text{ in.}$$

Jadi, apabila ujung rol dari balok bekerja secara tepat, dan apabila titik kumpul-titik kumpul memuai tidak tersumbat oleh kotoran (*debris*), balok akan mengalami ekspansi sekitar $\frac{1}{4}$ in. Apabila tidak, tegangan akan terjadi pada balok karena tegangan tersebut berusaha secara bebas untuk memanjang, namun alih-alih justru harus mendorong tumpuan-tumpuan ujungnya, yang secara efektif menekan secara aksial balok utama tersebut dengan sebuah gaya berlawanan yang besar.

Apabila balok utama tidak dapat memuai dan regangan adalah d = 0,00015 in./in., maka tegangan harus sebesar

$$f = d \times E = 0{,}00015 \times 30.000.000 = 4.500 \text{ psi}$$

Apabila balok utama memiliki luas penampang melintang A seluas 90 in^2, maka gaya tekan aksial yang dikerahkan untuk melawan tumpuan-tumpuannya adalah

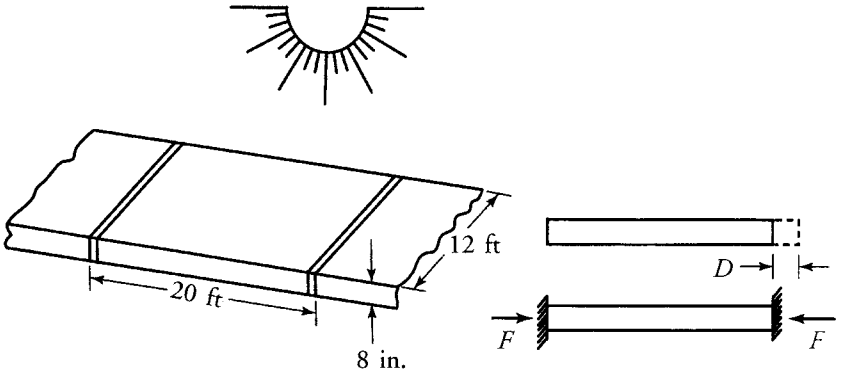
$$F = 4.500 \times 90 = 405.000 \text{ lb}$$

Ini adalah gaya sebesar 200 ton! Jelas terlihat bahwa kita tidak boleh mengabaikan potensi suhu yang dapat menghasilkan pengaruh yang signifikan pada struktur.

Apabila suhu turun sebesar 25°F, semua hal yang dinyatakan di atas mengalami pembalikan. Balok akan secara bebas menyusut 0,27 in. atau apabila tidak akan menarik tumpuan-tumpuan balok dengan sebuah gaya tarik sebesar 200 ton.

4.5 Tekuk Pada Perkerasan Jalan Raya Akibat Panas

Anda mungkin pernah menyaksikan kegagalan struktur yang diakibatkan-suhu, terutama apabila Anda tinggal di daerah iklim panas. Misalkan pada hari-hari yang sangat panas, suhu pada sebuah perkerasan jalan raya mengalami kenaikan sebesar 30° atau lebih. Titik kumpul-titik kumpul muai dari lantai-lantai jalan raya seringkali diberi jarak setiap 20 ft atau seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4.6. Ada kemungkinan titik kumpul-titik kumpul tersebut tidak memungkinkan perkerasan mengalami ekspansi, bisa jadi karena titik kumpul-titik kumpulnya terisi oleh kotoran, atau karena panas yang ekstrim telah menyebabkan titik kumpul-titik kumpulnya mengalami tekan hingga batasnya. Pada kasus ini, tegangan-tegangan termal yang sangat tinggi akan terjadi dalam sebuah penampang



GAMBAR 4.6

perkerasan, yang mengakibatkan keretakan pada perkerasan, bahkan kemungkinan dapat mengakibatkan tekuk yang meledak pada lantai.

Berapakah pemuaian yang terjadi akibat kenaikan suhu sebesar 25°F apabila titik kumpul-titik kumpul memungkinkan terjadinya pemuaian bebas? Berapakah tegangan aksial tekan yang dihasilkan apabila kenaikan suhu ini terjadi dengan pemuaian terkekang secara total akibat titik kumpul-titik kumpul pemuaian mengalami kegagalan?

Deformasi ekspansi adalah hasil kali dari regangan termal dengan panjang bagian struktur, yang sama dengan koefisien termal × perubahan suhu × panjang bagian struktur, atau

$$D = 0{,}000006 \times 25 \times (20 \times 12) = 0{,}036 \text{ in.}$$

Pemuaian bebas ini digambarkan pada gambar. Apabila pemuaian ini dicegah oleh gaya-gaya yang mengekang dari lantai-slab yang bersebelahan, seperti yang terlihat pada gambar, tegangan yang dihasilkan ketika lantai-slab yang bersebelahan secara efektif menekan dan memendekkan sebuah lantai dengan pemuaian bebas oleh $D = 0{,}036$ in. sama dengan regangan tekan dikalikan dengan modulus elastisitas bahan, atau

$$f = D/L \times E = 0{,}036/(20 \times 12) \times 3.600.000 = 540 \text{ psi}$$

Pada sebuah lantai dengan ketebalan 8 in. dan lebar 12 ft, tegangan ini sesuai dengan sebuah gaya tekan yang sangat besar, yaitu sebesar

$$F = f \times A = 540 \times \{12 \times (12 \times 12)\} = 933.000 \text{ lb}$$

Latihan

Misalkan titik kumpul-titik kumpul pemuaian memungkinkan terjadinya suatu pemuaian, misalnya sebesar 0,02 in. Pada kasus ini, berapa tegangan yang terjadi pada perkerasan jalan raya?

Selain itu, kerjakan kembali soal ini dengan mengasumsikan bahwa titik kumpul-titik kumpul terletak setiap 30 ft. ■

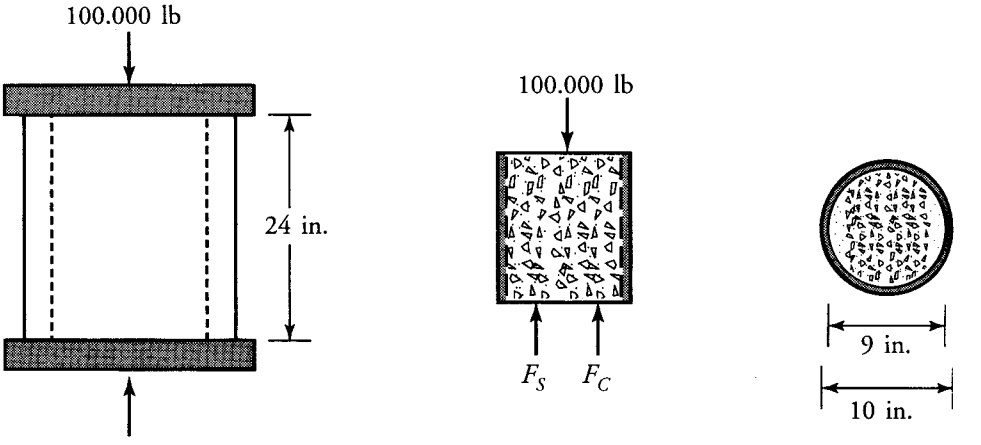
4.6 Bagian-bagian Struktur Komposit

Suatu bagian struktur komposit terdiri dari dua jenis bahan yang berbeda, yang bekerja secara paralel dalam menumpu sebuah beban. Pesawat terbang dan mobil kelas atas difabrikasi dari komposit-komposit modern berteknologi tinggi yang terbuat dari serat karbon dan dipasangkan dengan menggunakan resin-resin khusus. Apabila ketika serat karbon dan resin dikenakan panas dan tekanan, maka serat-serat karbon serta resin tersebut menyatu dan mengeras untuk menghasilkan bahan-bahan yang lebih kuat dan lebih ringan daripada baja.

Dalam teknologi rendah, semua bagian struktur beton yang diberi penulangan merupakan sebuah komposit dari beton dan baja yang bekerja sama untuk menahan tegangan-tegangan lentur pada balok dan tegangan tekan pada kolom. Selain itu, kita seringkali melihat balok kayu yang dikakukan dengan pelat sisi baja untuk memberikan kapasitas lentur tambahan pada elemen struktur kayu. Gambar 4.7 memperlihatkan sebuah penampang pipa baja berongga dengan ketebalan dinding pipa $\frac{1}{2}$ in. dan diameter bagian dalam 9 in. Bagian struktur tekan yang pendek ini adalah sebuah komposit dari pipa baja dan beton yang mengisi rongga lubang bagian dalam pipa tersebut.

Baik baja maupun beton masing-masing memikul bagian dari beban tekan yang diterapkan sebesar 100.000 lb, namun berapakah tepatnya yang ditanggung oleh masing-masing bagian? Kita akan mencoba untuk

GAMBAR 4.7



menentukan beban tekan aksial yang ditahan oleh baja dan beban tekan aksial yang ditahan oleh beton. Perhatikan bahwa kesetimbangan gaya vertikal menunjukkan bahwa gaya pada baja, F_S, ditambah gaya pada beton, F_C, harus sama dengan beban sebesar 100.000 lb yang diterapkan.

$$100.000 = F_S + F_C$$

Persamaan kesetimbangan gaya vertikal ini saja tidak akan dapat menyelesaikan dua gaya yang tak diketahui, dan persamaan kesetimbangan momen serta persamaan kesetimbangan horizontal tidak dapat membantu kita dalam menganalisis bagian struktur dua-gaya tekan ini. Jadi, persoalan tersebut merupakan persoalan yang tak tentu berdasarkan kesetimbangan, dan kita akan memerlukan hubungan (persamaan) yang lain di antara kedua gaya apabila kita ingin menyelesaikan dua anu yang tak diketahui.

Dengan mengamati bahwa kompatibilitas deformasi harus ada, kita dapat mengembangkan hubungan yang kedua. Kompatibilitas deformasi menunjukkan pada kita bahwa dengan dua bahan yang bekerja bersama-sama sebagai sebuah bagian struktur, gaya tekan sebesar 100.000 lb mengakibatkan pipa baja menjadi lebih pendek dengan panjang pemendekan yang sama untuk beton di dalam pipa yang juga menjadi lebih pendek. Kita sekarang dapat menerapkan hubungan di antara besaran-besaran deformasi dan besaran-besaran bagian struktur serta besaran-besaran bahan, $D = FL/AE$, sebagai berikut:

$$D = \frac{F_S \times L}{A_S \times E_S} = \frac{F_C \times L}{A_C \times E_C}$$

Dalam hubungan ini, panjang bagian struktur $L = 24$ in., modulus elastisitas beton $E_C = 3.600.000$ psi, dan modulus elastisitas baja $E_S = 30.000.000$ psi. Luas penampang melintang beton $A_C = \pi/4 \times 9^2 = 64$ in^2., dan penampang melintang baja $A_S = \pi/4 \times 10^2 - 64 = 15$ in^2. Dengan mensubstitusikan nilai-nilai ini, kita menemukan bahwa

$$\frac{F_S \times 24}{15 \times 30.000.000} = \frac{F_C \times 24}{64 \times 3.600.000}$$

Ini dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{F_S}{18.750.000} = \frac{F_C}{9.600.000}$$

Dengan penyederhanaan lebih lanjut, kita melihat bahwa $F_S \approx 2 \times F_C$, yang berarti bahwa baja seluas 15 in^2. memikul dua kali beban tekan sebesar 100.000 lb yang diterapkan, sama dengan yang dipikul oleh beton seluas 64 in^2. Penyebut dalam persamaan di atas mempresentasikan suku-suku AE/L individual untuk kedua jenis bahan.

Suku *AE/L* dikenal sebagai kekakuan bagian struktur, dan kita melihat bahwa baja dari bagian struktur komposit dua kali lebih kaku daripada betonnya, dan inilah alasan mengapa baja memikul dua kali beban lebih banyak daripada beton. Hal ini menunjukkan sebuah prinsip struktur dasar—*bagian terkaku dari sebuah struktur menarik bagian terbesar dari beban.*

Dengan menggabungkan hubungan kompatibilitas deformasi dan persamaan kesetimbangan, kita dapat menemukan gaya yang dipikul oleh beton:

$$100.000 = (2 \times F_C) + F_C$$

Dari sini kita dapatkan $F_C = 33.000$ lb, jadi gaya baja harus sebesar

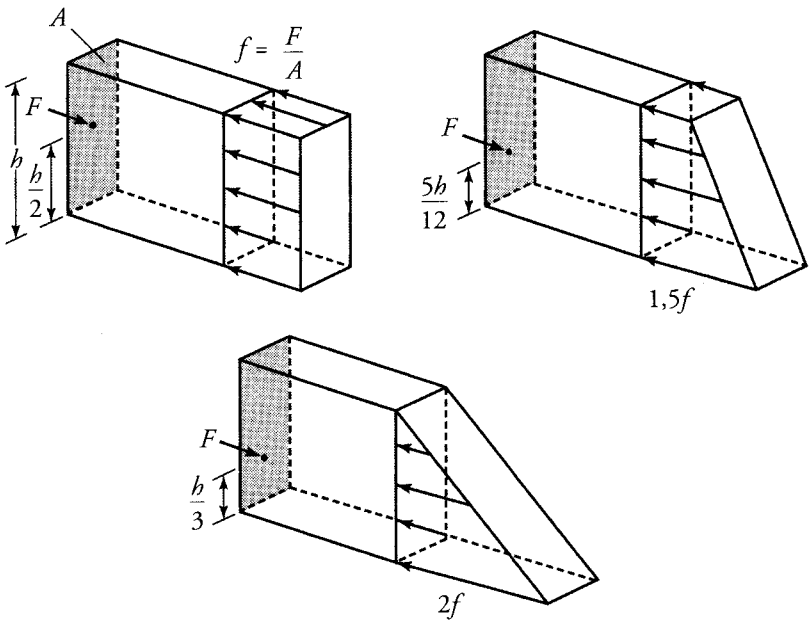
$$F_S = 2 \times F_C = 67.000 \text{ lb}$$

Latihan Kerjakan kembali soal ini untuk sebuah kolom kayu berukuran 13,5 in. × 13,5 in., dengan sebuah rongga berukuran 10,5 in. × 10, 5 in. yang diisi dengan sebuah produk busa keras yang memiliki modulus elastisitas $E = 200.000$ psi. ■

4.7 Titik Berat-Titik Berat dan Tegangan Aksial Nonuniform

Sejauh ini, kita telah meninjau tegangan-tegangan aksial yang bekerja secara merata pada penampang melintang dari sebuah bagian struktur. Ini terjadi pada kasus di mana garis kerja gaya berada di sepanjang garis yang membentuk sumbu longitudinal melalui apa yang dikenal sebagai titik berat dari tiap-tiap luas penampang melintang.

Apabila sebuah gaya aksial melalui titik titik berat dari setiap penampang melintang sepanjang bagian struktur, maka gaya tersebut dinyatakan bekerja secara sentris. Apabila garis kerja gaya berbeda dengan sumbu sentris bagian struktur, maka gaya tersebut bekerja secara eksentris dan gaya tersebut akan menghasilkan tegangan aksial tak-seragam. Pada Gambar 4.8, kita melihat distribusi tegangan aksial pada saat garis kerja gaya mendekat ke ujung bawah dari sebuah bagian struktur berbentuk persegi panjang. Pada tiap-tiap kasus yang digambarkan, tegangan rata-rata adalah $f = F/A$. Ketika gaya bekerja pada sepertiga dari tinggi bagian struktur dari bawah penampang, maka variasi tegangan yang dihasilkan membentuk sebuah irisan (*wedge*) dengan tegangan sebesar nol pada ujung atas dan dua kali tegangan rata-rata, $2 \times F/A$, pada ujung bawah.

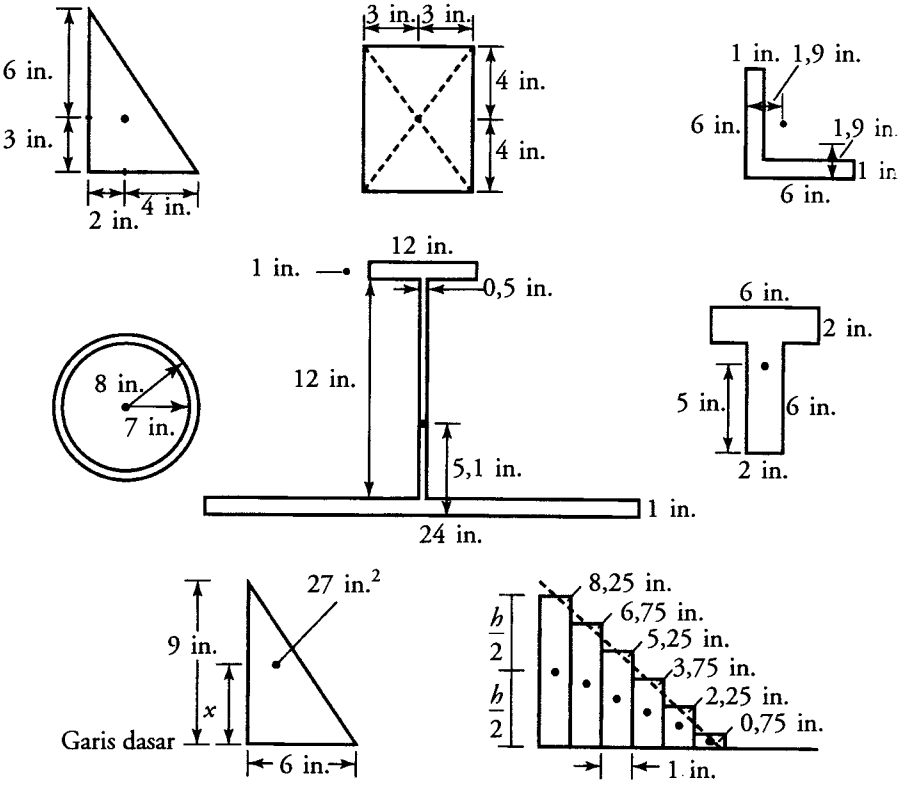


GAMBAR 4.8

Gambar 4.9 memperlihatkan beberapa luas penampang melintang dari bagian-bagian struktur yang berbeda, yang diberi label dengan lokasi-lokasi titik beratnya. Apabila kita berasumsi bahwa daerah manapun adalah pelat logam tipis, titik berat luas dari penampang melintang serupa dengan pusat gaya berat dari pelat tersebut. Kita ingat bahwa c.g adalah titik di mana berat dari pelat secara efektif terkonsentrasi, sehingga titik berat luas ditentukan sebagai titik di mana daerah total dari sebuah penampang secara efektif terkonsentrasi.

Sentroid atau titik berat dari beberapa luas yang berbeda diperlihatkan pada gambar dan dapat ditentukan dengan membagi luas atau area tersebut menjadi beberapa subpersegi panjang. Kita dapat memilih sebuah garis dasar sembarang, dan menyatakan bahwa luas total dikalikan dengan jarak titik beratnya pada garis dasar sama dengan apa yang disebut momen luas. Penjumlahan dari momen-momen subarea individual dikalikan dengan jarak titik beratnya masing-masing pada garis dasar harus sama dengan momen luas dari luas total yang utuh. Seperti terlihat pada gambar untuk luas berbentuk segitiga, dengan menyamakan momen luas dengan jumlah dari momen-momen subarea, kita dapat menentukan lokasi dari titik berat luas relatif ke garis dasar.

Kita memanfaatkan lokasi dari titik berat luas penampang melintang ketika kita sedang menyelidiki bagian-bagian struktur, terutama kolom dan



$$27(x) \approx \frac{8,25}{2}(8,25) + \frac{6,75}{2}(6,75) + \frac{5,25}{2}(5,25) + \frac{3,75}{2}(3,75)$$

$$+ \frac{2,25}{2}(2,25) + \frac{0,75}{2}(0,75)$$

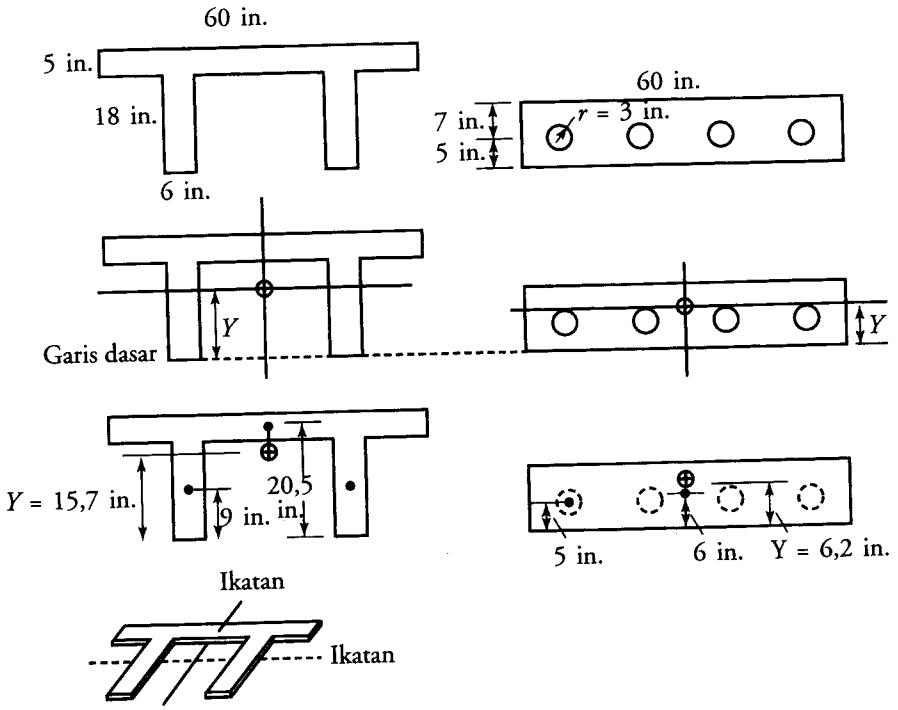
$$27(x) = 80,44$$

$$x = 2,98 \text{ in.}$$

GAMBAR 4.9

balok. Dua daerah berbeda yang diperlihatkan pada Gambar 4.10 adalah penampang melintang dari balok-balok beton prafabrikasi. Yang pertama disebut sebagai balok T ganda, dan yang kedua adalah sebuah panel lantai inti berongga.

Dengan mengingat apa yang sudah dinyatakan mengenai pusat gaya berat dan sentroid atau titik berat, lokasi horizontal dari titik berat-titik berat kedua luas terlihat dengan jelas terletak pada sebuah garis vertikal dari simetri yang diperlihatkan pada gambar. Ini adalah sumbu titik berat vertikal. Kita dapat membayangkan bahwa apabila luas area tersebut merupakan pelat-pelat metal tipis, dan sumbu-sumbu titik berat vertikal

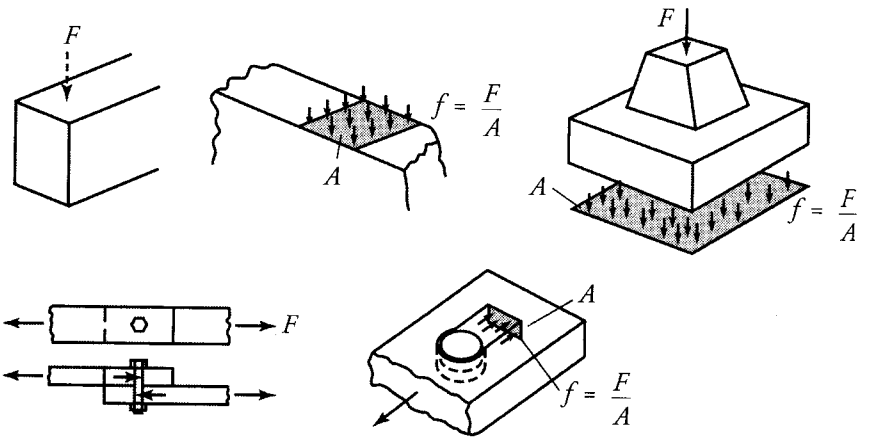


GAMBAR 4.10

merupakan ikatan (*strings*) yang ditegangkan, maka pelat-pelat dapat disetimbangkan oleh ikatan secara sempurna. Ini disebabkan karena pusat gaya berat—yaitu titik di mana semua berat pelat secara efektif terkonsentrasi—terletak di titik berat, sehingga bekerja langsung ke arah bawah pada ikatan. Gerakkan ikatan tersebut sedikit saja sehingga pusat gaya berat tidak langsung berada pada ikatan, maka berat pelat tersebut akan menghasilkan sebuah momen tak setimbang, yang menyebabkan pelat tersebut berotasi dan jatuh dari ikatan. Jadi, sebuah sumbu simetri, seperti sumbu vertikal pada kasus ini, akan merupakan sebuah sumbu titik berat.

Selanjutnya kita ingin menentukan sumbu titik berat horizontal dari tiap-tiap luas ini yang berhubungan dengan garis-garis dasar setiap luas. Jadi kita perlu menentukan jarak, Y, untuk tiap-tiap luas. Dengan pertama-tama melihat pada balok T ganda, luas tersebut dibagi lagi dengan titik-titik berat dari tiap-tiap sub-area seperti yang diperlihatkan pada gambar. Dengan tetap membayangkan luas tersebut sebagai sebuah pelat metal tipis, momen-momen yang dihasilkan oleh sub-area di sekitar garis dasar harus sama dengan momen luas dari luas total yang utuh, yang terkonsentrasi di titik berat. Untuk balok T ganda, kita mendapatkan

$$2 \times (6 \times 18) \times 9 + (5 \times 60) \times 20{,}5 = [5 \times 60 + 2 \times (6 \times 18)] \times Y$$



GAMBAR 4.11

Kita mendapatkan $Y = 15{,}7$ in.

Untuk lantai inti berongga, kita membagi lagi luas menjadi sebuah persegi panjang besar berukuran 60 in. × 12 in. tanpa luas dari empat lingkaran berdiameter 6 in., dan kita mendapatkan

$$(12 \times 60) \times 6 - (4 \times \pi \times 3^2) \times 5 = [(12 \times 60) - (4 \times \pi \times 3^2)] \times Y$$

yang menghasilkan $Y = 6{,}2$ in.

Untuk latihan, Anda mungkin ingin membuktikan kebenaran dari lokasi sumbu titik berat untuk area-area yang ditunjukkan pada Gambar 4.9.

4.8 Tegangan Dukung

Ketika bagian-bagian struktur menyalurkan beban-beban dari satu bagian ke bagian lainnya, penyaluran gaya-gaya ini harus terjadi pada beberapa luas yang saling berhubungan, dan luas tersebut harus cukup besar untuk mencegah terjadinya tegangan yang berlebihan pada titik-titik kontak. Pada Gambar 4.11, kita melihat bahwa *tegangan dukung* adalah tegangan tekan antara dua bagian struktur yang berada dalam keadaan kontak—tegangan ini juga dapat disebut *tegangan kontak*. Elemen-elemen struktur dalam kontak mengerahkan sebuah gaya yang sama dan berlawanan, F, satu sama lain, yang menimbulkan tegangan dukung, $f = F/A$, yang bekerja tegak lurus terhadap luas A, pada permukaan-permukaan kontak. Tegangan dukung antara balok dan tumpuan-tumpuannya, antara bagian-bagian bawah struktur (*footing*) dan tanah, dan antara struktur yang disambungkan

dengan baut adalah jenis-jenis yang paling umum dari tegangan dukung yang akan kita temukan dalam buku ini.

Sebagai contoh, anggaplah bahwa untuk tumpuan pilar seperti terlihat pada gambar, tekanan tanah yang aman di bawah bagian struktur dibatasi tidak lebih daripada $f = 2.000$ lb/ft^2 (psf). Apabila beban dari lantai, dinding-dinding, dan atap ke arah bawah adalah $F = 4.000$ lb pada pilar yang menumpu rumah ini, berapakah dimensi-dimensi yang diperlukan untuk bagian bawah struktur beton berbentuk persegi yang menyalurkan beban ke tanah?

Persoalan di atas sebenarnya cukup mudah diselesaikan. Karena $f = F/A$, kita mendapatkan

$$A = \frac{F}{f} = \frac{4.000}{2.000} = 2 \text{ ft}^2$$

Jadi, dimensi-dimensi bagian bawah struktur berbentuk persegi masing-masing $\sqrt{2} = 1{,}41$ ft (17 in.), dan kemungkinan kita akan menggunakan sebuah alas beton standar berukuran 18 in. × 18 in.

5 TEGANGAN GESER

5.1 TEGANGAN GESER SEDERHANA

Selain berbagai macam bentuk tegangan dukung dan tegangan aksial yang telah kita bahas, bentuk lain dari tegangan yang umumnya dialami oleh bagian-bagian struktur adalah *tegangan geser*. Sebenarnya, secara mendasar terdapat dua jenis tegangan: (1) tegangan yang bekerja secara tegak lurus (atau normal) terhadap sebuah permukaan—yakni tegangan lenturan, tegangan dukung, dan tegangan aksial; serta (2) tegangan yang bekerja secara tangensial terhadap sebuah permukaan—yakni tegangan geser lenturan, tegangan puntir, dan tegangan sederhana. Kita akan membahas tegangan lenturan nanti.

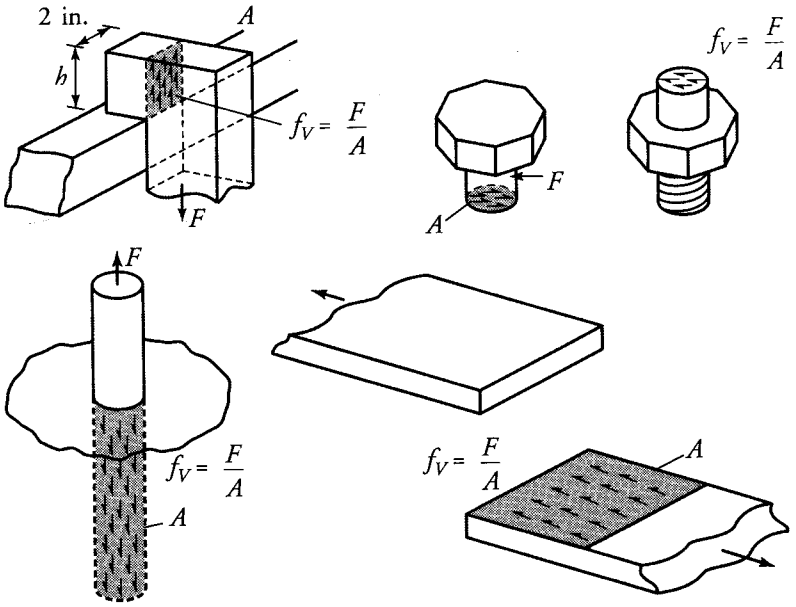
Gaya-gaya geser dinamakan seperti itu karena gaya-gaya tersebut menghasilkan aksi "menjepit" (*clipping*) di dalam sebuah bagian struktur (perhatikan bahwa gaya pada gunting dan penjepit rambut seringkali disebut gaya geser). Tegangan geser sederhana terjadi ketika aksi dari sebuah gaya geser didistribusikan pada sebuah luas penampang melintang yang paralel (atau tangensial) dengan gaya geser tersebut, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5.1. Tegangan geser sederhana akibat sebuah gaya geser F, yang bekerja pada sebuah luas penampang melintang A adalah

$$f_V = \frac{F}{A}$$

Subskrip V adalah sebuah identitas yang umum dari tegangan geser, yang membedakannya dengan tegangan-tegangan yang bekerja tegak lurus terhadap penampang melintang.

Penggantung bertakik pada gambar dibebani sebuah beban aksial tarik F = 1.000 lb, dan daerah yang diarsir $A = (2 \times h)$ in^2. Apabila kuat geser kayu pada permukaan-permukaan yang paralel terhadap tanah tidak diizinkan melebihi f_V = 100 psi, berapakah panjang dimensi h? Kita menjawab pertanyaan ini dengan menyusun kembali definisi dari tegangan. untuk menemukan bahwa

$$A = 2 \times h = \frac{F}{f_V} = \frac{1.000}{100} = 10 \text{ in}^2$$



GAMBAR 5.1

Oleh karena itu, $h = 5$ in. Apabila h lebih kecil daripada 5 in., kemungkinan terjadinya tegangan geser yang berlebihan akan bertambah besar, dan takik yang menonjol dapat terlepas akibat gaya yang bekerja ke arah bawah, F.

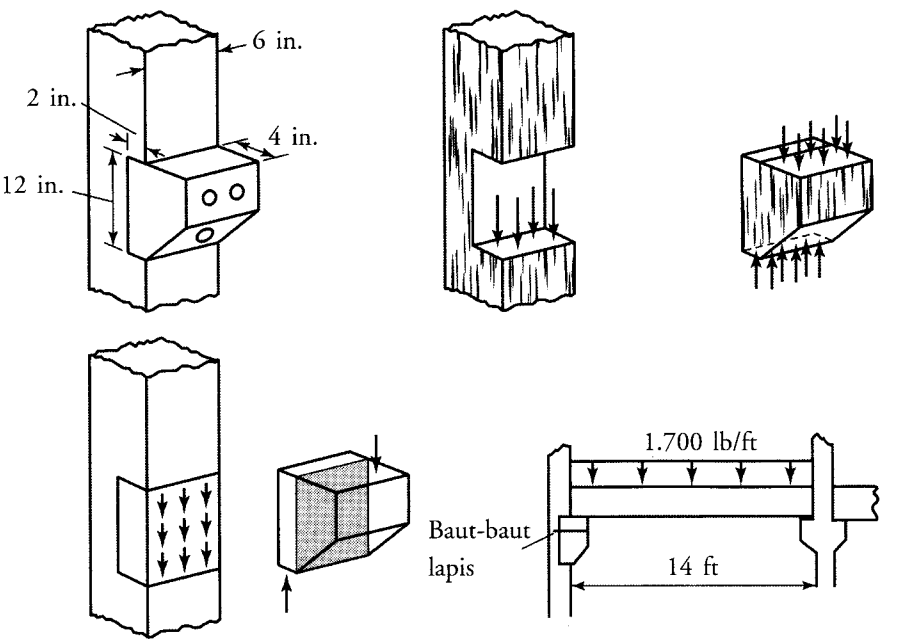
Geser seringkali terjadi pada daerah kontak antara benda-benda terpisah yang tersambung oleh gesek, adhesif, paku, baut, pengelasan, dan lain sebagainya. Sebagai contoh, tiang beton, sebuah bagian struktur yang umumnya digunakan dalam pondasi untuk menyalurkan beban-beban ke dalam tanah, pada gambar tersebut memiliki diameter, $d = 18$ in. (1,5 ft), dan panjangnya dalam tanah adalah $L = 20$ ft. Luas kontak antara tiang dan tanah adalah $A = \pi dL$. Kita dapat menguji tiang tersebut untuk menentukan tegangan gesek yang bekerja pada permukaannya dengan menarik tiang dari tanah dengan sebuah gaya F. Kemudian, kita dapat menentukan tegangan geser, f_V, antara tanah dan tiang, yang disebut gesek adhesi atau gesek kulit. Apabila gaya yang dibutuhkan adalah sebesar 45.000 lb untuk menarik tiang agar terbebas dari tanah, gesek kulit ditentukan menjadi sebesar

$$f_V = \frac{F}{A} = \frac{45.000}{\pi \times 1{,}5 \times 20} = 480 \text{ psf}$$

5.2 Tegangan Dukung dan Geser pada Sebuah Korbel

Sebuah *korbel*, atau *haunch*, adalah sepotong kayu horisontal (*ledge*) yang dipasangkan pada kolom untuk menumpu balok. Gambar 5.2 memperlihatkan sebuah korbel yang terbuat dari kayu yang menyalurkan reaksi tumpuan balok sebesar 12.000 lb ke sebuah kolom kayu. Kolom tersebut bertakik sehingga tegangan dukung antara korbel dan kolom menumpu reaksi balok. Terdapat juga tegangan dukung antara balok dan korbel, namun tegangan dukung tersebut merupakan tegangan yang lebih rendah, karena daerah kontaknya lebih besar. Korbel tampak menyalurkan beban balok ke kolom melalui tegangan geser yang sejajar dengan arah serat kayu. Untuk mencegah korbel mengalami putaran dan terlepas dari takik, korbel perlu dipastikan dalam keadaan terpasang ke kolom dengan sekrup-sekrup kayu besar yang disebut baut lapis (*lag bolt*), namun ini bukanlah pusat perhatian kita saat ini.

Anggap tegangan geser izin sejajar serat kayu adalah 80 psi., dan tegangan dukung ijin sejajar serat kayu adalah 1.000 psi. Tegangan dukung antara balok-balok dan korbel bekerja tegak lurus dengan serat kayu balok, dan tegangan dukung ini dibatasi sebesar 500 psi. Untuk mengecek apakah sambungan balok-ke-kolom sederhana ini cukup memadai, kita perlu



GAMBAR 5.2

menjawab beberapa pertanyaan. Apakah korbel dengan kedalaman 12 in. ini cukup memadai untuk mencegah terjadinya kegagalan geser? Apakah takik yang memiliki kedalaman 2 in. cukup dalam untuk mencegah tegangan yang berlebihan pada kolom? Apakah kayu korbel dengan lebar 4 in. cukup lebar untuk mencegah tegangan yang berlebihan pada balok?

Tegangan geser pada korbel adalah

$$f_V = \frac{F}{A} = \frac{12.000}{2 \times 6} = 167 \text{ psi}$$

Tegangan geser ini ternyata berlebihan. Apabila korbel tersebut nantinya digunakan, maka korbel akan memerlukan kedalaman h yang harus cukup memadai untuk mempertahankan tegangan geser sebesar 80 psi, jadi

$$\frac{F}{f_V} = h \times 6 = \frac{12.000}{80}$$

Didapatkan $h = 25$ in.

Tegangan dukung kritis pada korbel terjadi pada permukaan dukung bawah seluas 2-in. × 6-in., dan

$$f = \frac{12.000}{2 \times 6} = 1.000 \text{ psi}$$

Tegangan ini sama dengan tegangan ijin, jadi ini oke. Tegangan dukung yang tegak lurus terhadap serat kayu balok dihasilkan oleh reaksi balok dibagi dengan luas kontak antara balok dan kayu tumpuannya

$$f = \frac{12.000}{4 \times 6} = 500 \text{ psi}$$

Karena tegangan dukung sama dengan tegangan izin sebesar 500 psi, jadi ini juga oke.

Latihan

Apabila pada kasus ini balok memiliki bentang 10 ft (dan bukan 14 ft), berapakah ukuran takik dan tinggi korbel yang diperlukan? ■

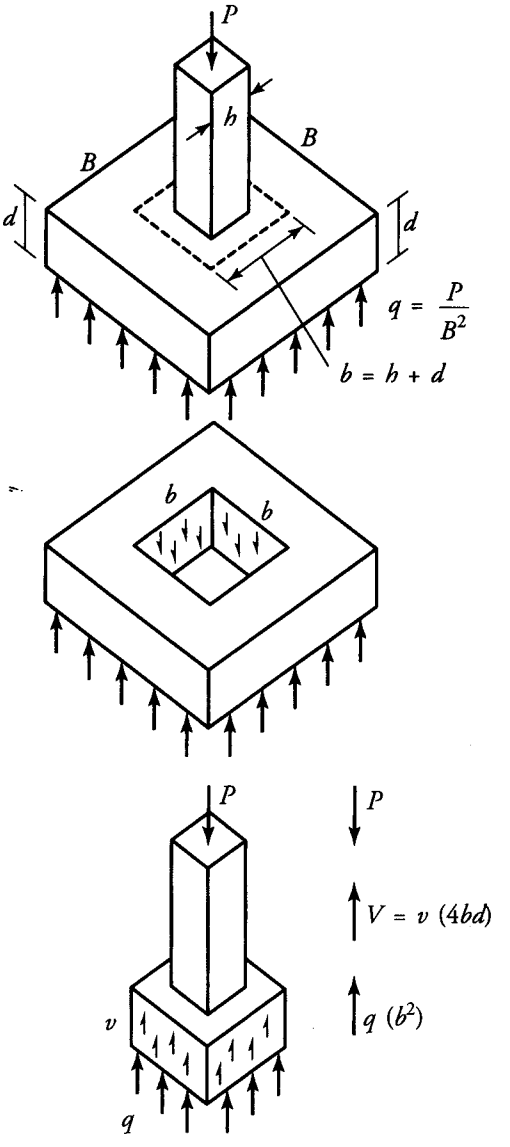
5.3 Geser Jeblos Melalui Pengkakian

Gambar 5.3 memperlihatkan sebuah beban kolom terpusat, P, yang disebarkan ke sebuah daerah yang lebih besar, $B \times B$, melalui penggunaan pengkakian (*footing*), yaitu jenis lain dari pondasi yang digunakan untuk "membenamkan ke tanah" beban-beban dari sebuah struktur. Melalui sebuah pengkakian, tekanan kontak (tegangan dukung) pada tanah dikurangi dari sebuah tegangan besar yang sama dengan tegangan aksial dari kolom beton.

$f = P/h^2$, menjadi sebuah tekanan uniform yang jauh lebih kecil, yang dapat ditahan oleh tanah:

$$q = \frac{P}{B^2}$$

GAMBAR 5.3



$$V = P - qb^2$$

$$\frac{V}{A} = v = \frac{q(B^2 - b^2)}{4 \times b \times d}$$

Apabila kita diberikan sebuah nilai beban yang akan dibenamkan ke tanah, P, dan tekanan tanah yang diizinkan, q, kita menentukan ukuran pengkakian yang diperlukan sebagai

$$B = \sqrt{\frac{P}{q}}$$

Jadi, dimensi pengkakian ukuran B yang diperlukan untuk menumpu sebuah beban kolom P ditentukan oleh tekanan tanah yang diizinkan, q.

Pengkakian harus cukup tebal agar dapat mencegah kolom menjeblos, seperti yang diperlihatkan pada gambar. Ukuran atau dimensi geser jeblos (*punching shear*) ini umumnya diasumsikan sebagai $b \times b$, dengan b adalah dimensi kolom, h, ditambah ketebalan efektif pengkakian, d:

$$b = h + d$$

Ketebalan pengkakian beton yang diperlukan ditentukan dengan membatasi tegangan geser jeblos yang bekerja pada empat sisi dari lubang keruntuhan potensial dengan daerah gesernya sebesar $4 \times b \times d$.

Diagram beban dari sebuah kolom yang telah melubangi pengkakian diperlihatkan pada gambar. Kesetimbangan gaya vertikal menunjukkan bahwa gaya geser adalah selisih dari beban kolom ke arah bawah yang besar dan gaya ke arah atas yang kecil akibat bekerjanya tekanan tanah uniform di sebelah bawah bagian pengkakian yang berlubang. Gaya geser menjadi

$$V = P - q \times b^2 = q \times B^2 - q \times b^2 = q \times (B^2 - b^2)$$

Tegangan geser yang dihasilkan gaya tersebut pada keempat permukaan dari porsi slab jeblosan persegi adalah

$$v = \frac{V}{A} = \frac{q \times (B^2 - b^2)}{4 \times b \times d}$$

Apabila sebuah kolom persegi yang masing-masing sisinya memiliki panjang 12 in., menyalurkan sebuah beban kolom sebesar 150.000 lb ke sebuah pengkakian, dan tekanan tanah yang diizinkan adalah 2.000 psf, berapakah lebar dasar dimensi yang diperlukan dari pengkakian berbentuk persegi? Apakah pengkakian struktur setebal 20 in. cukup memadai apabila tegangan geser penjeblosan tidak melebihi 70 psi?

Daerah pengkakian yang diperlukan, ditentukan seluas

$$A = B \times B = \frac{F}{f} = \frac{150.000}{2.000} = 75 \text{ ft}^2$$

Dari hasil di atas

$$B = \sqrt{75} = 8{,}66 \text{ ft} = 8 \text{ ft} - 8 \text{ in.}$$

Dimensi dari bagian persegi pengkakian yang cenderung mengalami penjeblosan adalah

$$b = h + d = 12 + 20 = 32 \text{ in.} = 2{,}67 \text{ ft}$$

Jadi, kita menghitung tegangan jeblos menjadi sebesar

$$v = \frac{q \times (B^2 - b^2)}{4 \times (b \times d)} = \frac{2.000 \times (8{,}66^2 - 2{,}67^2)}{4 \times (32 \times 20)} = 53 \text{ psi}$$

Karena $v = 53$ psi dan tidak melebihi tegangan yang diizinkan sebesar 70 psi, pengkakian cukup tebal dan cukup aman untuk mencegah terjadinya keruntuhan akibat penjeblosan.

Latihan Kerjakan kembali soal tersebut bila tekanan tanah yang diizinkan adalah 6.000 psf.

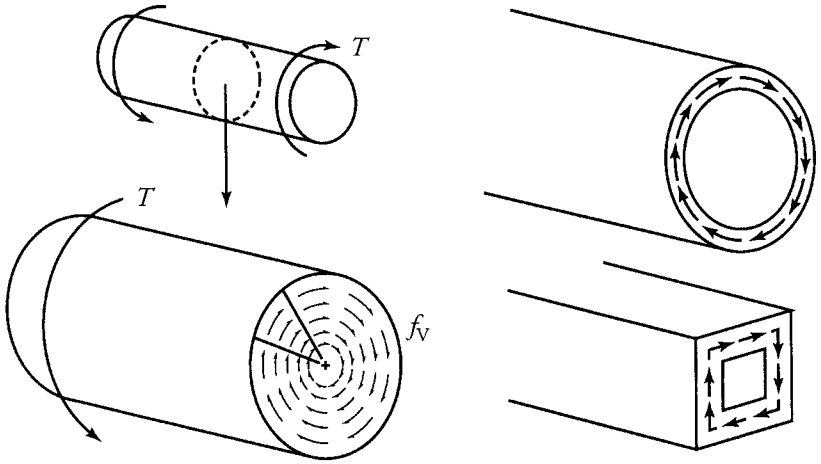
Kerjakan kembali soal ini dengan menggunakan kolom berukuran 16-in. × 16-in. yang memikul beban ke tanah sebesar 225.000 lb. ■

5.4 Tegangan Geser Puntir

Walaupun tegangan ini bukanlah tegangan yang umumnya terjadi pada bangunan dan jembatan, bentuk lain dari tegangan geser dihasilkan oleh gaya pelintir dari tenaga putaran (*torque*), dan disebut *tegangan geser puntir*. Mungkin, contoh yang paling umum dari tegangan geser puntir ini adalah pada batang (*shaft*) transmisi melingkar yang menyambungkan mesin kendaraan dengan roda-rodanya, atau peralatan seperti sebuah pompa atau kompresor udara. Mesin memutar batang pada satu ujung, menggerakkan sebuah alat yang menahan dengan sebuah putaran balik—aksi sama dengan reaksi. Aksi pelintir, yang juga disebut torsi, sebenarnya merupakan momen yang bekerja di sekitar sumbu longitudinal batang yang berputar tersebut. Gambar 5.4 memperlihatkan putaran yang menahan arah batang yang berputar, T.

Kita dapat melihat bahwa sebuah batang yang dipotong menjadi dua penampang akan memperlihatkan tegangan geser puntir yang memungkinkan transfer torsi dari satu ujung ke ujung yang lainnya. Ingatlah bahwa tegangan geser bekerja secara tangensial terhadap sebuah

GAMBAR 5.4



permukaan—pada kasus ini, luas penampang melintang dari batang. Untuk batang yang padat, tegangan bervariasi besarnya, dari nol di tengah bentang hingga nilai maksimumnya pada radius luar, sedangkan untuk batang yang berongga, tegangan umumnya konstan di sekitar luas penampang cincin, seperti yang diperlihatkan pada gambar.

Tegangan puntir terjadi pada bagian-bagian struktur seperti balok bangunan luar, dan balok-blok lintang jembatan yang secara horisontal dilengkungkan. Bagian-bagian struktur ini biasanya berbentuk-I atau penampang-penampang melintang persegi panjang, yang harus menahan torsi dengan mengembangkan tegangan aksial puntir (disebut *tegangan warping*) dan geser puntir yang kompleks, yang lebih parah daripada geser puntir sederhana pada penampang-penampang melintang yang melingkar. Oleh karena itu, kita umumnya mencoba meminimalisasi puntir pada bagian-bagian struktur, dan apabila puntir terjadi, kita mencoba bentuk melingkar atau paling tidak bentuk tertutupnya, seperti balok persegi panjang atau tabung berongga.

5.5 Pemusatan Tegangan dan Baut

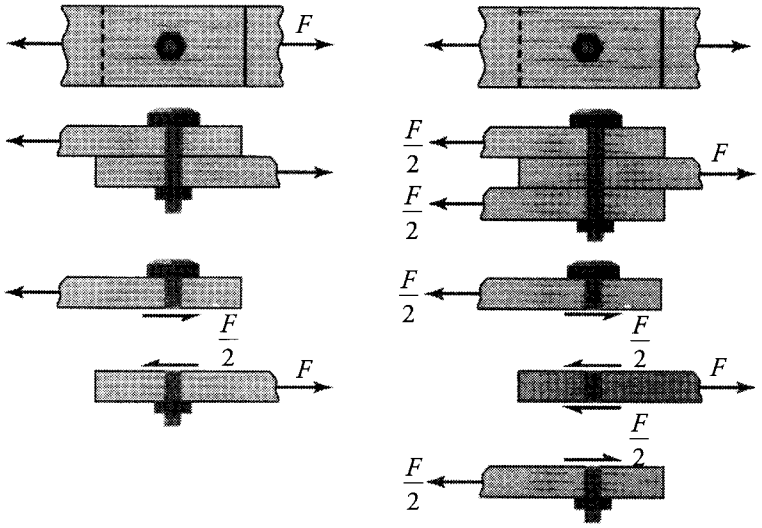
Terdapat banyak sekali cara untuk menyambungkan bagian-bagian struktur, dan kita akan melihat beberapa detail sambungan yang umum digunakan, ketika kita membahas desain. Tegangan-tegangan yang terjadi pada penyambung bisa menjadi sangat rumit. Bahkan sambungan baut dan sambungan pengelasan yang paling dasar melibatkan beberapa jenis tegangan.

Untuk sambungan-sambungan jenis-pendukung yang dibaut, yang mencakup paku, pasak kayu, tulangan baja, atau penyambung-penyambung seperti-dowel, gaya yang disalurkan melalui bagian-bagian struktur yang tersambung bekerja sebagai sebuah gaya geser yang cenderung menjepit baut dalam setengah bagian atas dan setengah bagian bawah ketika tegangan geser, $f_V = F/A$ menjadi tegangan yang berlebihan (Gambar 5.1). Istilah *sambungan baut pendukung* mengacu pada fakta bahwa gaya, F, pada sebuah bagian struktur disalurkan ke bagian struktur lainnya melalui peletakan antara baut dan satu sisi lubang pada masing-masing bagian struktur. Tekanan dukung adalah $f = F/A$, dengan A adalah persegi panjang yang terproyeksi sama dengan diameter baut dikalikan dengan ketebalan bagian struktur (Gambar 4.11).

Sambungan-sambungan jenis-gesek yang dibaut dinamakan seperti itu karena baut-baut dikencangkan dengan sebuah tenaga putaran yang besar, sehingga kedua bagian struktur yang disatukan terjepit bersama-sama dan saling mengunci dalam gesek. Gaya F antara bagian-bagian struktur tersebut ditransfer melalui tegangan geser f_V ini, seperti halnya apabila kedua bagian struktur tersebut direkatkan menjadi satu (Gambar 5.1). Sambungan-sambungan seperti ini seringkali disebut kritis -gelincir (*slip-critical*) karena sambungan-sambungan tersebut tidak memiliki kekenduran pada sambungan-sambungan pendukungnya, di mana baut-baut harus mengalami perubahan di dalam lubang-lubang baut yang sedikit lebih besar untuk menahan bagian-bagian struktur yang menahan lubang-lubang baut tersebut.

Pada Gambar 5.5, kita melihat dua konfigurasi dasar dari sambungan-sambungan yang dibaut: geser tunggal dan geser ganda. Dalam geser tunggal, dua bagian struktur yang tersambung cenderung menggeser baut dalam dua dari hanya satu bidang, sedangkan dua bidang geser dihasilkan untuk baut-baut melalui tiga bagian struktur. Penyambung-penyambung geser tunggal biasanya menyambungkan sebuah elemen struktural sekunder yang dibebani secara ringan ke sebuah bagian struktur utama. Sambungan-sambungan geser ganda digunakan untuk menyalurkan beban yang lebih besar dari sepasang bagian struktur yang serupa ke sebuah bagian struktur tunggal, atau begitu pula sebaliknya.

Misalkan sambungan geser ganda tersebut memiliki empat baut yang masing-masing berdiameter 1 in.—dua baris masing-masing terdiri dari dua baut—menyambungkan tiga pelat masing-masing dengan ketebalan $\frac{3}{4}$ in., dan gaya pada sambungan $F = 12.000$ lb. Berapakah tegangan dukung kritis, dan berapakah tegangan geser pada baut-baut tersebut? Tegangan dukung kritis terjadi pada bagian struktur utama di mana gaya sebesar 12.000 lb ditransfer dalam peletakan pada empat daerah yang terproyeksi, dan tiap-tiap daerah pendukung yang terproyeksi sama dengan



Geser tunggal Geser ganda

GAMBAR 5.5

$$A = 1 \times \frac{3}{4} = \frac{3}{4} \text{ in}^2$$

Tegangan dukung menjadi sebesar

$$f = \frac{12.000}{\frac{3}{4} \times 4} = 4.000 \text{ psi}$$

Tegangan dukung pada delapan luas pendukung dari bagian-bagian struktur sisi dengan tebal $\frac{3}{4}$ in. hanyalah setengah dari nilai di atas. Tegangan geser baut terjadi pada dua bidang dari tiap baut, untuk total dari delapan bidang dengan luas total,

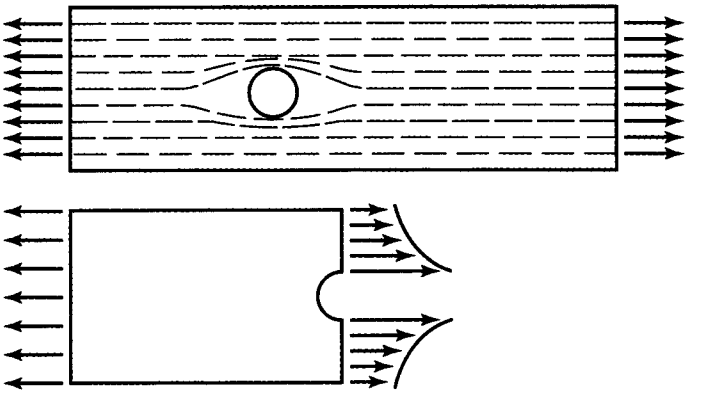
$$A = 8 \times \left(\pi \times \frac{1}{4} \times 1^2 \right) = 6{,}28 \text{ in}^2$$

Sehingga tegangan geser menjadi sebesar

$$f_V = \frac{12.000}{6{,}28} = 1.910 \text{ psi}$$

Jelas terlihat, bahwa lubang baut mengurangi luas penampang melintang A dari bagian-bagian struktur yang tersambung. Karena tegangan adalah gaya per luas, tegangan-tegangan aksial bagian struktur bertambah di dekat lubang-lubang baut karena luas penampang neto berkurang. Analisis

GAMBAR 5.6



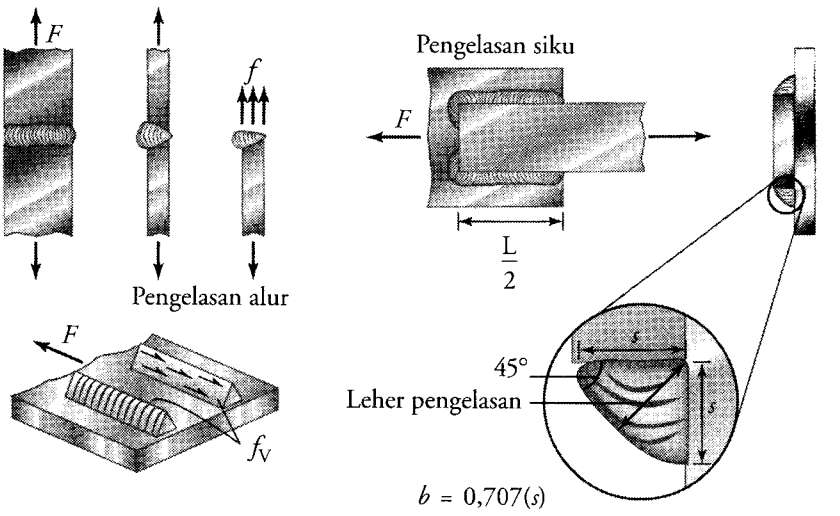
yang aktual mengenai tegangan-tegangan di sekitar baut adalah analisis yang cukup rumit. Tegangan-tegangan harus "mengalir" di sekitar lubang baut dan pemusatan tegangan terjadi di sekeliling lubang, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5.6. Para perancang detail struktural harus cermat dalam membuat dimensi sambungan-sambungan yang dibaut, demi mencegah tegangan yang bertambah di sekitar baut-baut menjadi sebuah persoalan yang serius.

5.6 PENGELASAN

Pengelasan juga merupakan sebuah metode yang umum digunakan untuk menyambungkan bagian-bagian struktur baja, terutama sambungan-sambungan yang dapat dikerjakan di bengkel pengelasan (dibandingkan pekerjaan di lapangan, di mana kita lebih untung untuk menggunakan baut-baut. Dalam pengelasan, baja dari dua bagian struktur yang terpisah dilebur menjadi satu dengan menggunakan sebuah elemen baja ketiga, yaitu sebuah batang las yang digunakan para pengelas dengan cara mendekatkan batang tersebut ke kedua bagian struktur secara hati-hati di sepanjang sambungan pengelasan yang diinginkan. Ketiga elemen baja tersebut melebur bersama-sama dalam panas yang intens, yang berasal dari sebuah busur listrik yang dihasilkan oleh arus elektrik yang dibuat untuk menyatukan jarak yang dekat dari ujung batang las baja dengan kedua bagian struktur yang disatukan. Gambar 5.7 memperlihatkan dua jenis utama pengelasan—pengelasan alur (*groove weld*), dan pengelasan siku (*fillet weld*).

Pengelasan alur diorientasikan secara transversal terhadap sumbu longitudinal dari dua bagian struktur yang dibebani secara aksial dan mentransfer tegangan aksial, $f = F/A$, antara bagian-bagian struktur tersebut. Ini disebut sebuah titik kumpul belakang (*butt joint*). Apabila dikerjakan

GAMBAR 5.7



dengan tepat, pengelasan seperti ini bisa jadi lebih kuat daripada dua bagian struktur yang disatukan.

Pengelasan siku mentransfer gaya aksial dari satu bagian struktur melalui geser pada pengelasan ke bagian struktur kedua. Seperti yang terlihat pada gambar, tegangan geser pengelasan adalah $f_V = F/A$, dengan luas geser efektif adalah total panjang pengelasan, $2 \times L/2$ pada kasus ini, dikalikan dengan leher pengelasan, sebesar $0{,}707 \times s$. Ukuran pengelasan ditunjukkan oleh dimensi-dimensi kaki pengelasan, s. Sebuah ukuran pengelasan yang umum digunakan adalah $\frac{5}{16}$ in. Tegangan geser dari sebuah pengelasan siku biasanya dibatasi sebesar f_V = 18.000 psi. Dengan memasukkan batas ini secara bersama, gaya yang dapat disalurkan per in. dari pengelasan siku sebesar $\frac{5}{16}$ in. adalah

$$F = f_V \times A = 18.000 \times \left(1 \times 0{,}707 \times \frac{5}{16}\right) = 4.000 \text{ lb/in.}$$

5.7 Sambungan Baut dan Sambungan Las

Penampang berbentuk melingkar merupakan bentuk penggunaan yang paling efisien untuk kolom, namun kita seringkali menggunakan penampang terbuka seperti balok berbentuk-I ketika memilih kolom baja, karena lebih mudah bagi kita untuk menyambungkan kolom-kolom baja tersebut dengan balok. Apabila sebuah pipa berongga atau tabung persegi panjang digunakan, balok-balok tidak dapat dengan mudah dibautkan ke penampang-

PERPUSTAKAAN

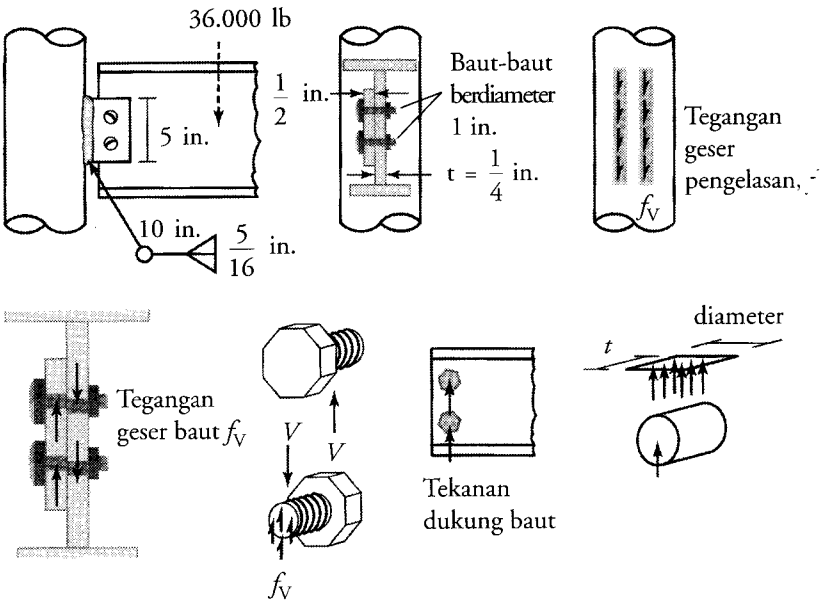
penampang tersebut, sehingga biasanya harus dilas. Karena lebih mudah dan lebih diinginkan untuk mengerjakan pendirian bangunan di lapangan dengan baut-baut dibandingkan dengan pengelasan, sebuah cara praktis untuk menggunakan sambungan-sambungan lapangan yang dibaut dari sebuah balok baja berbentuk-I dengan sebuah kolom pipa baja berongga diperlihatkan pada Gambar 5.8.

Pada kasus ini, sebuah pelat berukuran 5 in. × $\frac{1}{2}$ in. dilas di bengkel las di sekitar ujung-ujung kontak dengan pipa untuk total sebesar 10 in. dari pengelasan siku sebesar $\frac{5}{16}$ in. Di lapangan, dua baut masing-masing berdiameter $\frac{1}{2}$ in akan menyatukan balok berbentuk-I melalui jaringan (*web*) balok setebal $\frac{1}{4}$ in. Apabila reaksi yang disalurkan oleh balok ke kolom adalah 36.000 lb, kita ingin menentukan apakah pengelasan siku tersebut cukup memadai. Juga, kita dapat mengecek tegangan geser pada pengelasan-pengelasan dan baut-baut, serta mengecek tekanan dukung baut pada jaringan balok berbentuk I tersebut.

Kekuatan sebuah pengelasan siku standar sebesar $\frac{5}{16}$ in. terlihat sebesar 4.000 lb/in. Karena total panjang pengelasan yang diberikan adalah sepanjang 10 in., maka kapasitas pengelasan adalah 40.000 lb, yang lebih besar dari kekuatan yang diperlukan sebesar 36.000 lb, sehingga pengelasan tersebut OKE. Tegangan geser aktual pada pengelasan tersebut adalah

$$f_V = \frac{F}{A} = \frac{36.000}{10 \times 0{,}707 \times 5/16} = 16.300 \text{ psi}$$

GAMBAR 5.8



Luas geser dari kedua baut dalam geser tunggal diberikan sebesar

$$A = 2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times 1^2 \right) = 1{,}57 \text{ in}^2.$$

Tegangan geser pada baut menjadi sebesar

$$f_V = \frac{F}{A} \frac{36.000}{1{,}57} = 22.900 \text{ psi}$$

Ini mendekati kisaran tegangan geser maksimum yang diizinkan dari baut-baut berkekuatan-tinggi (27.000 psi untuk baut-baut A325 pada sambungan jenis-pendukung).

Tekanan dukung antara baut-baut dan pelat jaringan dari balok berbentuk-I ditentukan sebagai gaya reaksi total dibagi dengan luas proyeksi dari kontak antara kedua baut berdiameter 1 in. dan pelat jaringan setebal $\frac{1}{4}$ in.:

$$f_V = \frac{F}{A} = \frac{36.000}{2\left(1 \times \frac{1}{4}\right)} = 72.000 \text{ psi}$$

Tegangan dukung baja yang diizinkan sangatlah besar, biasanya melebihi 90.000 psi, sehingga kita tidak memiliki masalah dengan peletakan baut-baut terhadap jaringan dari balok. Perhatikan bahwa karena pelat yang dilas ke kolom lebih tebal daripada jaringan, tegangan dukung pada elemen pelat sambungan akan menjadi lebih kecil.

Latihan

Biasanya diinginkan untuk memiliki detail-detail sambungan simetris. Misalkan dua pelat berukuran $\frac{5}{16}$ in. × 5 in. masing-masing diberikan pengelasan siku ke sebuah pipa dengan panjang 5 in. dan pengelasan siku sebesar $\frac{1}{4}$ in untuk tiap-tiap pelat. Lalu dua baut berdiameter $\frac{3}{4}$ in. digunakan untuk menyambungkan balok berbentuk-I ke kedua pelat pada sebuah sambungan geser ganda. Berapakah besar tegangan pada pengelasan dan baut-baut, dan berapakah tekanan dukung kritis akibat baut-baut tersebut? ■

6 TEGANGAN DAN DEFORMASI PADA BALOK

6.1 TEGANGAN LENTUR

Arti balok untuk struktur dapat diibaratkan seperti arti tingkat suk... bunga bagi bursa saham—hampir segalanya. Balok tidak saja merefleksik... segala sistem struktur, namun seperti yang telah kita bahas, bahkan berbag... elemen struktur dan subsusunan struktur yang bukan merupakan balo... seperti kolom, kabel, rangka batang, dan diafragma, juga diperlakuk... sebagai balok. Pada kasus struktur jembatan, kita bahkan dapat menyatak... bahwa seluruh sistem struktur bekerja sebagai bagian struktur horison... yang menumpu beban pada sebuah bentang—dengan kata lain, sebu... balok!

Pada penampang manapun sepanjang balok, kemungkinan terda... tiga reaksi internal: sebuah gaya aksial, sebuah gaya geser transversal, d... sebuah momen lentur. Sebelumnya kita telah memperlihatkan cara-c... untuk menentukan besar reaksi-reaksi internal tersebut deng... menggunakan metode potongan. Sekarang kita akan memusat... perhatian pada tegangan akibat momen lentur, kemudian pada tegan... akibat gaya geser transversal, dan selanjutnya pada pelenturan, a... lendutan, yang terjadi pada sebuah balok.

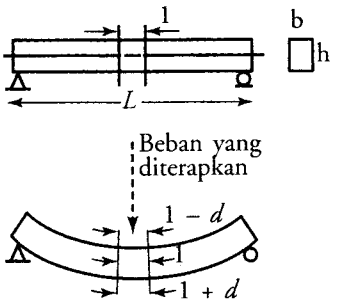
Dari ketiga reaksi internal, gaya aksial, gaya geser, dan momen le... kita telah membahas secara mendetail mengenai tegangan dan defor... yang terjadi akibat gaya aksial. Tegangan aksial yang terjadi apabila terd... sebuah gaya aksial tidak bergantung pada tegangan-tegangan akibat g... geser dan lentur. Kita akan melihat bahwa momen lentur a... menghasilkan tegangan di sepanjang sumbu longitudinal dari ba... struktur balok yang serupa dengan tegangan aksial, sehingga se... tegangan aksial seperti ini akan melapis tegangan lentur (kita a... membahas topik ini pada bab berikutnya).

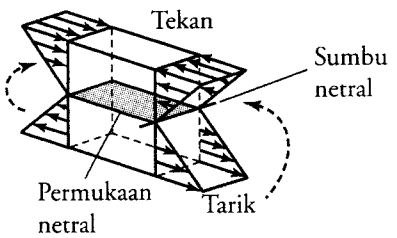
Sebuah balok yang menumpu beban transversal dikatakan be... dalam keadaan lenturan (*flexure*), mengacu pada lentur atau len... yang dapat terjadi pada balok-balok. Deformasi yang terjadi akibat le... disebut *lendutan*. Tegangan-tegangan, baik yang ada akibat momen le...

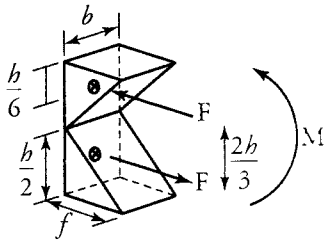
maupun gaya geser pada balok disebut *tegangan-tegangan lenturan*. Kedua jenis tegangan yang sangat berbeda ini saling berkaitan—tegangan geser berasal dari tegangan lentur, seperti yang akan kita lihat. (Faktanya, dalam analisis secara matematis, kita mengetahui dari ilmu kalkulus bahwa sebuah persamaan yang merumuskan geser pada balok bisa ditemukan sebagai derivatif dari persamaan momen.)

Untuk pembahasan ini, kita akan memusatkan perhatian kita pada sebuah balok dengan penampang melintang persegi panjang, seperti diperlihatkan pada Gambar 6.1. Lebar dan tinggi dari penampang balok masing-masing adalah b dan h. Kita menemukan sebuah segmen dari balok dengan menggambar dua garis paralel pada sisi-sisi bagian struktur lurus yang tak dibebani, yang dipisahkan oleh jarak satuan, 1. Kita akan melakukan pengamatan pada sebuah balok terbesar yang mengalami lendutan, di mana garis-garis tersebut sekarang dirapatkan bersama di atas, dengan segmen yang diperpendek sepanjang $1 - d$, dan garis-garis teregang menjauh di bawah, dengan segmen yang memanjang $1 + d$. Ingatlah bahwa d adalah regangan, atau deformasi satuan. Tidak ada perubahan pada tinggi tengah balok, di mana panjang segmen masih sama dengan jarak satuan, 1.

Karena d merupakan regangan, dan kita mengetahui bahwa tegangan proporsional terhadap regangan, kita menyimpulkan bahwa setengah bagian atas dari balok mengalami irisan (*wedge*) dari tegangan tekan, dan setengah bagian bawah mengalami irisan dari tegangan tarik. Tegangan lentur, f, memiliki nilai terbesar di atas dan bawah balok. Tegangan lentur tersebut bekerja secara tegak lurus terhadap







$$F = \frac{f}{2}\left(b \times \frac{h}{2}\right)$$

$$M = F \times \frac{2h}{3} = f \times \frac{bh^2}{6} = f \times S$$

$$f = M/S$$

GAMBAR 6.1

penampang melintang dan berada dalam arah longitudinal dari balok. Tinggi tengah balok merupakan sebuah permukaan netral di mana kedua sisi tegangan sebesar nol dari irisan-irisan bertemu. Perpotongan dengan permukaan netral ini di tinggi tengah balok dengan sebuah luas penampang melintang disebut sumbu netral, seperti yang ditunjukkan pada gambar.

Kedua irisan tegangan menghasilkan dua gaya tekan dan gaya tarik saling melawan yang sama, yang ditentukan sebagai tegangan irisan rata-rata dikalikan dengan luas penampang, atau

$$F = \frac{1}{2} \times f \times b \times \frac{h}{2}$$

Gaya-gaya yang saling melawan dan sama besar ini bekerja di titik berat irisan, dan terpisah oleh sebuah lengan tuas sebesar $2/3 \times h$. Gaya-gaya yang saling melawan dan sama besar serta dipisahkan oleh sebuah lengan tuas ini menghasilkan sebuah kopel lentur internal yang sama dan menahan momen lentur eksternal, M, yang disebabkan oleh beban-beban pada balok. Momen kopel internal adalah

$$M = F \times \frac{2}{3}(h) = f \times \frac{b \times h^2}{6}$$

Istilah $b \times h^2/6$ disebut modulus penampang (*section modulus*), S. Modulus penampang adalah sebuah ukuran kapasitas momen dari penampang melintang balok persegi panjang. Modulus penampang untuk bentuk penampang melintang balok lainnya, selain bentuk penampang melintang balok berbentuk persegi panjang, juga dapat ditentukan. Sebagai contoh, pada kasus balok-balok baja berbentuk-I, nilai S biasanya diberikan oleh tabel, namun S dapat dengan mudah dihitung seperti yang nanti akan kita lihat. Satuan modulus penampang diberikan dalam in^3. Sekarang kita dapat menulis rumus lenturan, yang memberikan tegangan lentur, f, dalam istilah-istilah momen lentur yang diterapkan, M, dan modulus penampang balok, S:

$$f = \frac{M}{S}$$

Rumus tersebut memiliki kesamaan dengan rumus tegangan dasar $f = F/A$, dan digunakan secara serupa. Dengan menyusun ulang ketiga suku dari rumus lenturan, kita dapat mengecek tegangan yang diterapkan, menentukan ukuran penampang balok yang diperlukan (S), atau membandingkan kapasitas momen dari alternatif-alternatif balok. Perhatikan bahwa tegangan lentur maksimum pada sebuah balok terjadi di serat atas balok dan serat bawah balok dari sebuah penampang di mana momen lentur internal adalah yang tertinggi (di tengah bentang untuk kebanyakan balok sederhana).

Sebagai contoh, anggaplah bahwa balok pada Gambar 6.1 memiliki panjang 20 ft, tinggi 18 in., dan lebar 6 in., serta memikul beban terpusat seberat 10.000 lb di tengah bentang. Reaksi tumpuannya masing-masing menjadi sebesar 10.000/2 = 5.000 lb, dan di sebuah penampang tengah bentang, momen lentur yang diterapkan secara eksternal sama dengan reaksi dikalikan dengan 20/2 ft, atau M = 50.000 ft-lb (600.000 in-lb). Modulus penampang balok menjadi

$$S = \frac{6 \times 18^2}{6} = 324 \text{ in}^3$$

Dari rumus lenturan, kita menghitung tegangan lentur internal yang menghasilkan:

$$f = \frac{M}{S} = \frac{600.000}{324} = 1.850 \text{ psi}$$

Sebagai contoh kedua, anggaplah bahwa tegangan tertinggi yang diizinkan adalah f = 1.850 psi, namun beban pada balok sepanjang 20 ft di contoh di atas bertambah dua kali lipat menjadi 20.000 lb. Momen yang diterapkan juga bertambah dua kali lipat dan kita akan memerlukan sebuah balok modulus penampang sebesar

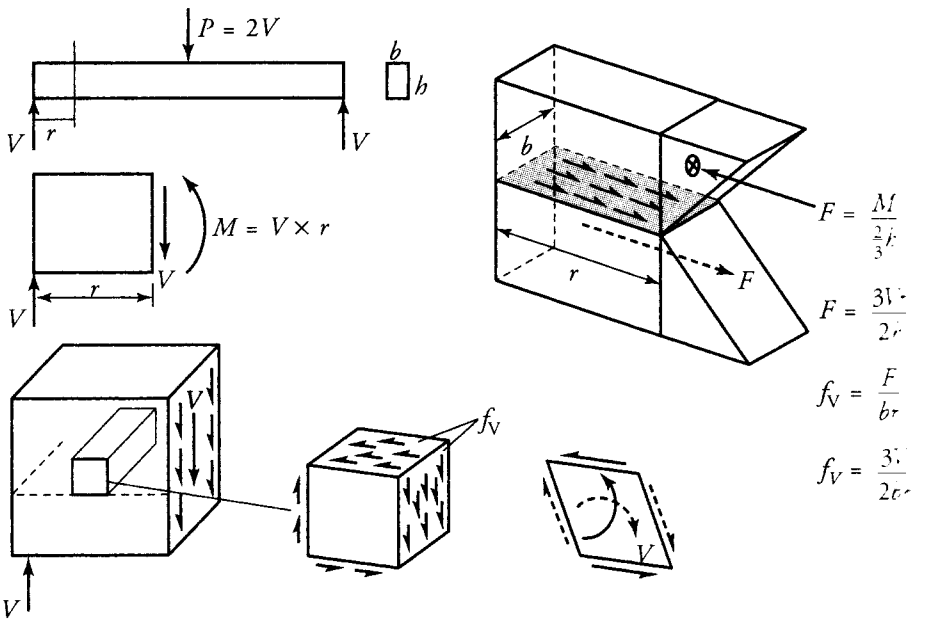
$$S = \frac{M}{f} = \frac{1.200.000}{1.850} = 648 \text{ in}^3$$

Apabila kita ingin mempertahankan lebar balok sepanjang 6 in., maka kita memerlukan sebuah tinggi balok yang baru,

$$h = \sqrt{\frac{6 \times S}{b}} = \sqrt{\frac{6 \times 648}{6}} = 25{,}5 \text{ in.}$$

6.2 Tegangan Geser Lenturan

Telah dinyatakan sebelumnya bahwa gaya geser transversal internal disebut geser lentur, dan terkait dengan momen lentur internal. Tinjaulah Gambar 6.2, di mana penampang sebelah kiri dari panjang sembarang r diambil dari sebuah balok sederhana yang memikul beban terpusat di tengah bentang. Seperti yang terlihat pada gambar, setengah bagian atas dari balok persegi panjang akan mengalami geser di sepanjang permukaan netral pada tinggi tengah balok oleh gaya irisan F, kecuali terdapat sebuah gaya horisontal yang melawan yang sama di sepanjang bidang netral untuk menahannya. Gaya di sepanjang permukaan netral ini menghasilkan tegangan geser horisontal f_V yang sebanding dengan gaya geser transversal V pada tiap-tiap penampang di sepanjang bagian struktur.



GAMBAR 6.2

Seperti pada kasus-kasus sebelumnya, gaya irisan dikalikan lengan momen kopel sama dengan tahanan (*resistance*) momen internal dari balok, sehingga kita melihat bahwa gaya irisan adalah

$$F = \frac{M}{\frac{2}{3} \times h}$$

Gaya yang sama pada permukaan netral yang menahan gaya irisan ini adalah hasil kali dari tegangan geser dan luas di mana tegangan geser tersebut bekerja

$$F = f_V \times b \times r$$

Gaya ini adalah tegangan geser dikalikan dengan luas permukaan dari permukaan netral, yaitu luas yang diarsir, seperti yang terlihat pada gambar. Dari kesetimbangan penampang balok sebelah kiri, kita menemukan bahwa momen lentur adalah

$$M = V \times r$$

Seperti yang diperlihatkan pada gambar, ketika kita memasukkan ketiga hubungan ini bersama-sama, kita mendapatkan rumus tegangan geser lenturan

$$f_V = \frac{3 \times V}{2 \times b \times h} = 1{,}5 \times \frac{V}{A}$$

Tegangan geser maksimum f_V terjadi pada sebuah balok di penampang di mana gaya geser transversal internal V mencapai nilai maksimum—biasanya di sebuah tumpuan. Jadi, rumus tegangan geser lenturan menunjukkan pada kita bahwa tegangan geser lenturan maksimum f_V pada sebuah penampang dari gaya geser transversal maksimum adalah 1,5 kali gaya geser V ini, terbagi rata pada luas penampang melintang A.

Apabila tegangan horisontal dihitung pada permukaan manapun lainnya yang sejajar terhadap permukaan netral, irisan dari tegangan lentur yang digunakan untuk menghitung gaya geser F akan terpotong sehingga irisan dari tegangan lentur tersebut nilainya menjadi lebih kecil. Sebagai hasilnya, kita dapat menyimpulkan bahwa tegangan geser lenturan mencapai sebuah nilai maksimum pada sumbu netral, di mana irisan yang penuh bekerja, dan tegangan geser menurun hingga nol di bagian atas balok serta bagian bawah balok. Bagian atas balok dan bagian bawah balok seringkali disebut serat-serat luar dari balok, dan kita melihat bahwa tegangan-tegangan geser adalah nol pada titik-titik di mana sebelumnya kita menemukan bahwa tegangan tekuk lenturan berada pada nilai tertingginya—di serat-serat luar balok.

Mungkin terlihat aneh apabila tegangan geser yang dihasilkan pada sebuah bidang horisontal berasal dari gaya geser yang transversal terhadap bidang ini, namun apabila kita melihat pada elemen struktur persegi yang kecil yang diambil dari balok, seperti yang terlihat pada gambar, kita dapat melihat mengapa hal ini terjadi. Tegangan geser yang bekerja pada permukaan-permukaan horisontal dari elemen struktur yang kecil yang diambil dari balok tersebut harus berkaitan dengan tegangan vertikal yang sama pada permukaan vertikalnya (yang sesuai dengan penampang-penampang melintang balok). Apabila tidak, elemen struktur persegi yang kecil tersebut bagaimanapun caranya akan mengalami perputaran. Perhatikan bahwa geser-geser pada keempat permukaannya akan menghasilkan tegangan pada elemen struktur tersebut—ini adalah model deformasi yang terkait dengan geser.

Seperti rumus lenturan untuk tegangan lentur, hubungan geser lenturan dapat disusun kembali untuk memenuhi kebutuhan-kebutuhan dari situasi tersebut. Sebagai contoh, ingatlah contoh mengenai sebuah balok berukuran 6 × 25,5 sepanjang 20 ft yang menumpu sebuah beban seberat 20.000 lb di tengah bentang. Gaya geser internal transversal di manapun sepanjang balok merupakan sebuah konstanta

$$V = \frac{20.000}{2} = 10.000 \text{ lb}$$

Luas penampang melintang adalah

$$A = 6 \times 25,5 = 153 \text{ in}^2$$

Dan tegangan geser maksimum adalah

$$f_V = 1{,}5 \times \frac{10.000}{153} = 98 \text{ psi}$$

Apabila penampang-penampang melintang balok persegi panjang merupakan bentuk-bentuk penampang yang paling umum digunakan untuk balok beton dan balok kayu, balok baja lebih sering memiliki penampang berbentuk-I. Tegangan geser lenturan pada sebuah balok berbentuk-I bekerja dengan cara yang sama seperti pada sebuah penampang melintang berbentuk persegi panjang. Tegangan mencapai nilai tertinggi pada tinggi tengah, namun tidak seperti sebuah penampang melintang berbentuk persegi panjang, tegangan geser dari penampang melintang berbentuk-I pada dasarnya konstan di sepanjang tinggi penuh, h. Oleh karena itu, tegangan geser pada balok berbentuk-I umumnya diperkirakan sebagai

$$f_V = \frac{V}{A_W}$$

dengan $A_W = h \times t_W$, dan t_W adalah ketebalan web.

6.3 Lendutan-lendutan Balok

Kita telah mencatat untuk sebuah balok sederhana bahwa deformasi yang terkait dengan lenturan balok menghasilkan sebuah pencekungan (*sag*) ke arah bawah yang disebut defleksi (lendutan). Apabila lendutan ini berlebihan—bahkan apabila tegangan-tegangan berada dalam batas yang aman—balok tersebut tidaklah cukup kaku, dan agar balok tersebut dapat digunakan, diperlukan ukuran balok yang lebih besar. Lendutan yang berlebihan akan menyebabkan plester plafon menjadi retak, lantai berderit dan melenting, pintu menjadi macet, para pengguna jembatan terkena mabuk darat, dan lain sebagainya. Kita akan melihat bahwa sifat lendutan dari sebuah bagian struktur balok juga sangat penting dalam analisis kolom dan struktur tak tentu.

Perhitungan secara teoretis dari lendutan balok bisa menjadi sangat membosankan, dan hanya bisa menghasilkan sebuah perkiraan dari pencekungan sebenarnya, karena kondisi-kondisi ideal yang diasumsikan pada kenyataannya tidak terpenuhi. Tidak ada satupun rumus praktis yang akan dapat menyelesaikan semua konfigurasi tumpuan dan semua konfigurasi beban balok yang mungkin terjadi. Banyak sekali rumus lendutan yang dapat digunakan untuk menyelesaikan lendutan dalam kondisi-kondisi tumpuan yang umum dan kondisi-kondisi pembebanan balok yang umum, termasuk bagian-bagian struktur tak tentu dan bagian-bagian struktur kantilever. Kita akan berkonsentrasi pada lendutan dari

balok yang paling umum digunakan—balok sederhana—dan menghasilkan rumus lendutan pendekatan yang berguna.

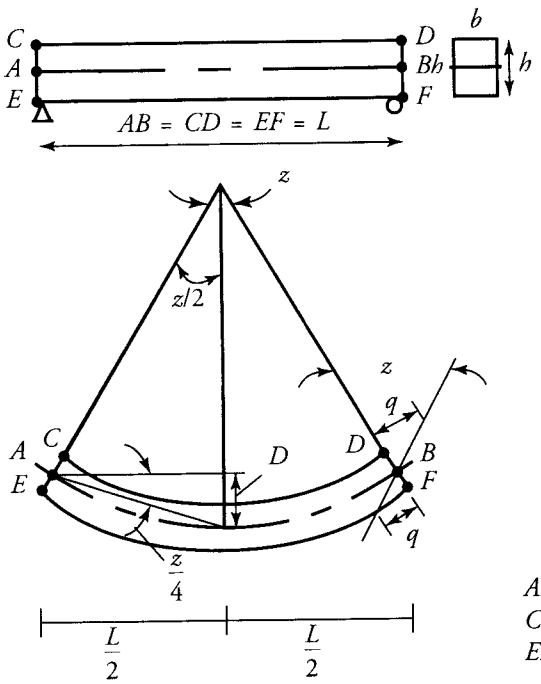
Lendutan D dari sebuah balok dengan bentang L terjadi ketika setengah bagian atas dari balok memendek, sedangkan setengah bagian bawah memanjang, seperti diperlihatkan pada Gambar 6.3, di mana kita melihat bahwa $CD < AB < EF$. Saat ini diasumsikan bahwa setiap penampang balok mengalami lentur dengan momen yang sama, sehingga elemen struktur yang melengkung memiliki sebuah jari-jari yang konstan dan membentuk sebuah segmen dari lengkungan yang melingkar.

Seperti yang terlihat pada gambar, ujung-ujung dari kemiringan balok saling mendekati satu dengan yang lainnya untuk membentuk sebuah sudut yang sangat kecil, z. Sedangkan q melambangkan deformasi memendek tekan atas dan peregangan tarik bawah yang sama dari serat-serat balok. Ingatlah bahwa deformasi keseluruhan sama dengan deformasi satuan dikalikan dengan panjang, dan deformasi satuan adalah regangan, d, yang sebanding terhadap tegangan, $d = f/E$, dan kita mendapatkan

$$q = d \times L = \frac{f}{E} \times L$$

Sudut z terlihat merupakan penjumlahan dari dua deformasi aksial ini dibagi dengan tinggi balok h:

$$z = \frac{2 \times \frac{f}{E} \times L}{h}$$



GAMBAR 6.3

Dari bentuk geometri balok yang melengkung, seperti yang diperlihatkan pada gambar, sudut yang terbentuk oleh perbandingan dari lendutan balok D terhadap setengah panjang balok, $L/2$, adalah $z/4$, sehingga rumus lain untuk sudut z adalah

$$z = \frac{8 \times D}{L}$$

Dengan menyamakan kedua rumus untuk sudut z, kita mendapatkan lendutan balok untuk sebuah balok yang mengalami momen merata (dan tegangan lentur merata) menjadi

$$D = \frac{f \times L^2}{4 \times E \times h}$$

Rumus ini menunjukkan bahwa lendutan dari sebuah balok proporsional terhadap tegangan lentur pada bagian struktur dan bentuk persegi dari bentang, sedangkan rumus tersebut secara terbalik berhubungan dengan kekakuan elastis material dan kedalaman balok.

Bentuk alternatif dari persamaan ini dapat ditulis apabila kita menggantikan tegangan lentur f dengan M/S, dan mengidentifikasi sebuah besaran penampang melintang yang baru, yang disebut momen luas inersia I, dalam satuan in^4, dan diberikan sebagai

$$I = S \times \frac{h}{2}$$

Rumus lendutan balok alternatif menjadi

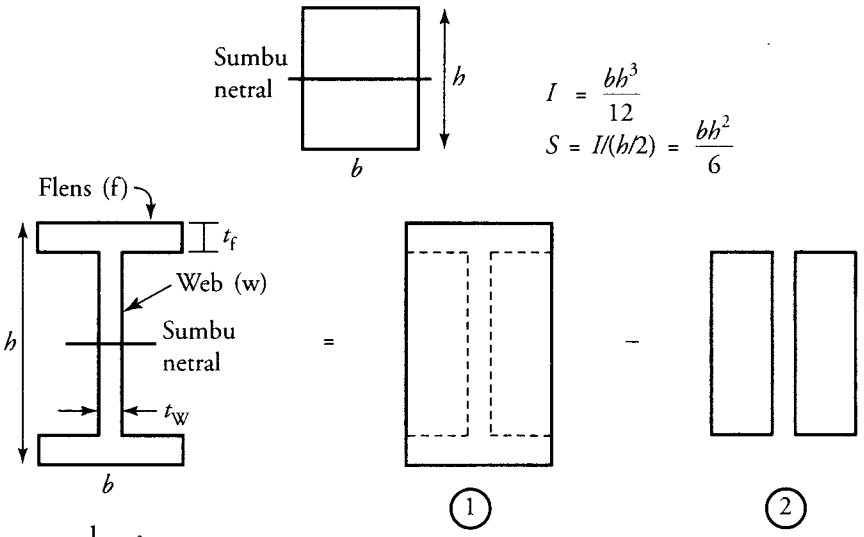
$$D = \frac{M \times L^2}{8 \times E \times I}$$

Dalam rumus ini, lendutan balok terkait dengan momen lentur yang diterapkan pada bagian struktur dan hasil kali $E \times I$, yang seringkali disebut *kekakuan balok*, atau kekakuan bagian struktur (*member rigidity*).

Jadi, kekakuan bagian struktur EI adalah hasil kali dari kekakuan material E, dan profil penampang melintangnya, yang diukur oleh I. Untuk penampang melintang persegi panjang,

$$I = S \times \frac{1}{2} \times h = \frac{b \times h^3}{12}$$

Untuk balok baja berbentuk-I, nilai I biasanya diperoleh dari tabel, namun nilai-nilai tabular yang dilaporkan ini dengan mudah dihitung sebagai penjumlahan dari momen-momen inersia persegi panjang yang positif dan momen-momen inersia persegi panjang yang negatif, seperti yang dicontohkan pada Gambar 6.4. Kita akan melihat jenis-jenis perhitungan seperti ini dalam pembahasan mengenai desain baja.



$$I = \frac{bh^3}{12}$$

$$S = I/(h/2) = \frac{bh^2}{6}$$

$$I_1 = \frac{1}{12}bh^3$$

$$I_2 = 2 \times \frac{1}{12}(b - t_W)(h - 2 \times t_f)^3$$

$$S = (I_1 - I_2)/(h/2)$$

$$I = I_1 - I_2$$

GAMBAR 6.4

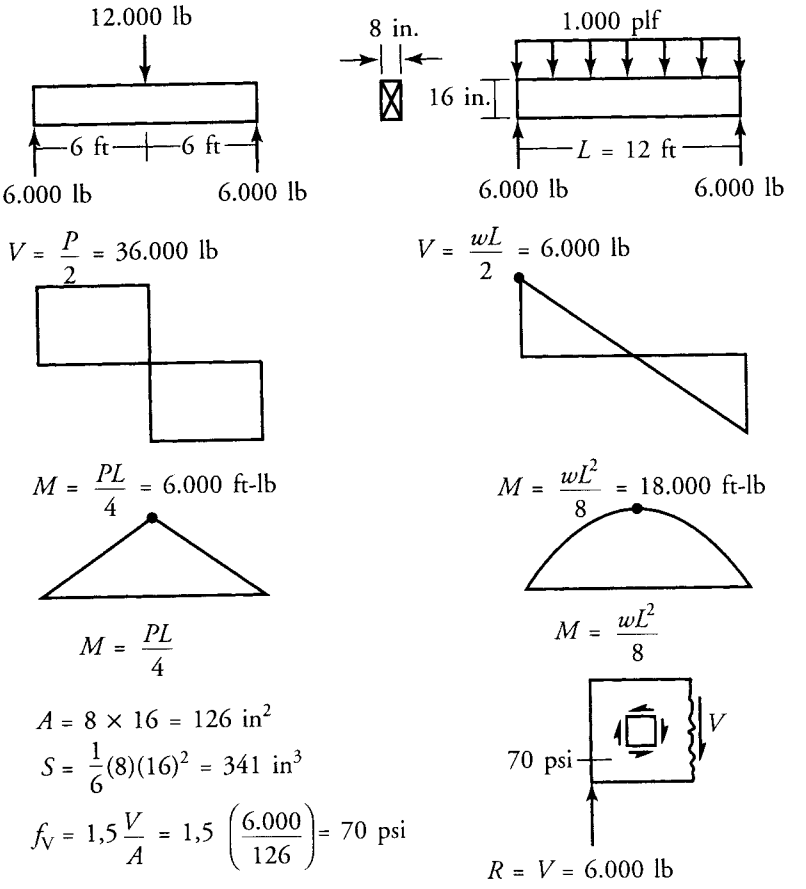
Sejauh ini, rumus-rumus lendutan didasarkan atas asumsi bahwa setiap penampang dari balok sederhana mengalami momen lentur yang sama, *M*. Biasanya, pembebanan pada sebuah balok sederhana menghasilkan sebuah momen lentur rata-rata di sepanjang bagian struktur yang sama dengan sekitar 80% dari momen tertinggi, sehingga kita dengan mudah dapat mengalikan rumus-rumus lendutan dengan 0,8, yang menghasilkan rumus-rumus pendekatan untuk lendutan balok sederhana, sebagai berikut:

$$D = \frac{f \times L^2}{5 \times E \times h} = \frac{M \times L^2}{10 \times E \times I}$$

Rumus-rumus ini menghasilkan estimasi yang cukup memadai dari lendutan balok untuk kebanyakan balok sederhana yang menumpu beban-beban merata atau beberapa beban terpusat yang tersebar pada bentang dari balok. Ketika satu-satunya beban pada sebuah balok adalah beban terpusat tunggal di tengah bentang, lendutan yang dihasilkan lagi-lagi akan sebesar 80% seperti yang dihasilkan oleh rumus-rumus pendekatan ini. Ini disebabkan oleh segmen kecil dari balok yang langsung di bawah beban tengah bentang, yang mengalami tegangan lentur penuh dan momen lentur penuh, di mana untuk beban-beban merata, momen-

momen yang tertinggi terjadi pada porsi yang lebih besar dari balok, seperti yang dapat kita amati pada Gambar 6.5.

Mari kita lihat sebuah balok 6 in. × 25,5 in. sepanjang 20 ft (240 in.) seperti pada contoh terdahulu, yang menumpu sebuah beban seberat 20.000 lb di tengah bentang. Seperti yang sebelumnya telah kita tentukan, balok memiliki momen maksimum di tengah bentang M = 1.200.000 in-lb, dan



Balok kiri

$$f = \frac{M}{S} = \frac{36.000(12)}{341} = 1.270 \text{ psi}$$

$$D = (80\%)\frac{fL^2}{5Eh} = 0{,}8\,\frac{(1.270)(12 \times 12)^2}{5(1.600.000)(16)} = 0{,}16 \text{ in.}$$

Balok kanan

$$f = \frac{18.000(12)}{341} = 635 \text{ psi} \qquad D = \frac{635(12 \times 12)^2}{5(1.600.000)(16)} = 0{,}10 \text{ in.}$$

GAMBAR 6.5

sebuah tegangan lentur yang terkait f = 1.850 psi. Asumsikan balok tersebut merupakan sebuah balok kayu dengan modulus elastisitas E = 1.600.000 psi. Momen inersia adalah $I = bh^3/12 = (6 \times 25{,}5^3)/12 = 8.290$ in^4. Kita dapat mensubstitusikan nilai-nilai ini ke bentuk manapun dari rumus lendutan. Dengan menggunakan rumus yang didasarkan atas tegangan, dan mengingat bahwa apabila hanya satu beban terpusat yang menyebabkan semua tegangan lentur pada sebuah balok, lendutan lagi-lagi akan sebesar 80% seperti yang dihasilkan oleh rumus-rumus pendekatan, kita menemukan bahwa balok tersebut akan mengalami pencekungan sebesar

$$D = (0.80)\frac{1.850 \times 240^2}{5 \times 1.600.000 \times 25{,}5} = 0{,}4 \text{ in.}$$

Anda mungkin ingin membuktikan apakah benar bahwa rumus lendutan yang menggunakan kekakuan balok dan momen akan memberikan hasil yang sama.

Sebagai contoh yang lain, tinjau sebuah balok berbentuk-I baja sederhana sepanjang 50 ft, memiliki kedalaman 36 in., dan dibebani secara uniform, di mana semua beban hidup ditambah semua beban mati menghasilkan sebuah tegangan yang sama dengan f penuh yang diizinkan = 24.000 psi. Berapakah pelenturan yang akan terjadi? Lendutan adalah sebesar

$$D = \frac{f \times L^2}{5 \times E \times h} = \frac{24.000 \times (50 \times 12)^2}{5 \times 30.000.000 \times 36} = 1{,}6 \text{ in.}$$

Lendutan-lendutan balok biasanya dibatasi pada beberapa fraksi bentang L dari balok, seperti $L/240$ untuk semua beban, atau $L/360$ untuk beban-beban hidup saja. Untuk kasus ini, di mana semua beban dimasukkan dalam tegangan total sebesar 24.000 psi, D = 1,6 in. akan memadai, karena lendutan yang diizinkan akan menjadi (50 × 12)/240 = 2,5 in. Bagian balok yang umum menghasilkan rasio balok bentang-terhadap-kedalaman L/h dari 20 hingga 25, dan apabila nilai-nilai L/h melebihi kisaran ini, lendutan tersebut dapat dianggap cukup besar dan kemungkinan dapat menentukan ukuran-ukuran balok.

Dari rumus lendutan yang didasarkan atas kekakuan bagian struktur dan momen, kita melihat bahwa perbandingan dari momen terhadap lendutan adalah konstanta yang diberikan oleh

$$\frac{M}{D} = \frac{10EI}{L^2}$$

Ketika kita meninjau kolom-kolom yang lurus, kita akan melihat bahwa tetapan perbandingan ini melambangkan sebuah gaya yang disebut beban tekuk kritis, F_{CR}, yaitu sebuah gaya aksial yang akan menahan lendutan

dari sebuah bagian struktur, D, dalam kesetimbangan, karena tidak adanya beban transversal yang menghasilkan momen internal M. Sebaliknya, untuk sebuah bagian struktur balok yang dibebani secara transversal, perbandingan dari momen balok sederhana yang dibebani secara merata terhadap lendutan yang terjadi sama dengan beban tekuk dari bagian struktur yang sama, yang digunakan sebagai sebuah kolom.

Pada akhir dari bab ini, kita akan melihat beberapa contoh sederhana mengenai balok kayu, balok baja, dan balok beton. Contoh-contoh ini sangat berguna baik untuk mengilustrasikan prinsip deformasi pada balok dan prinsip tegangan pada balok, maupun untuk mempersiapkan kita agar lebih intensif dalam memusatkan perhatian pada desain struktur yang terbuat dari material-material tersebut. Bab ini akan ditutup dengan sebuah contoh klasik mengenai bagaimana kompatibilitas deformasi dapat digunakan untuk menyelesaikan gaya-gaya dari sebuah balok tak tentu.

6.4 Lentur, Geser, dan Lendutan pada Sebuah Balok Kayu

Kita telah menghasilkan rumus umum untuk deformasi balok lenturan dan tegangan balok lenturan dengan menggunakan balok sederhana yang memiliki bentuk penampang melintang persegi panjang karena bentuk ini merupakan yang paling mudah untuk dikerjakan. Karena kebanyakan balok kayu memiliki penampang melintang berbentuk persegi panjang, maka cara termudah untuk mempelajari prinsip-prinsip struktur dasar, adalah dengan mempelajari balok-balok kayu.

Pada Gambar 6.5, nilai-nilai tumpuan, nilai-nilai diagram geser, dan nilai-nilai diagram-diagram momen, semuanya sudah ditentukan untuk dua balok kayu sederhana yang memiliki bentang 12 ft dengan penampang-penampang melintang yang memiliki lebar 8 in. dan kedalaman 16 in. Tiap-tiap bentang menumpu beban seberat 12.000 lb, dengan balok sebelah kiri menumpu beban seberat 12.000 lb sebagai sebuah beban terpusat tunggal, sedangkan balok sebelah kanan menumpu beban terdistribusi secara merata sebesar 1.000 plf. Kita akan membandingkan lendutan dan tegangan geser serta lentur maksimum pada tiap-tiap balok.

Untuk kedua balok tersebut, kita melihat dari diagram geser bahwa gaya geser maksimum adalah 6.000 lb, yang juga merupakan reaksi pada tumpuan balok. Jadi, pada kedua kasus ini, tegangan geser maksimum yang terjadi pada sumbu netral pada penampang balok dari tegangan geser maksimum adalah f_V = 70 psi, seperti yang diperlihatkan pada gambar. Tegangan ini terjadi pada sumbu netral, tidak hanya pada ujung-

ujung dari bentang yang dibebani secara merata, namun juga terjadi di sepanjang balok dengan beban terpusat. Apabila tegangan menjadi berlebihan, pembagi-pembagi (*splits*) horisontal akan terbentuk pada sumbu netral di ujung-ujung balok yang dibebani secara merata dan juga terjadi pada sumbu netral di sepanjang balok yang dibebani secara terpusat. Ingatlah bahwa tegangan geser memiliki nilai-nilai yang sama secara horisontal dan secara vertikal, dan kayu lebih lemah dalam geser di sepanjang seratnya (secara horisontal) daripada dalam geser yang melintangi seratnya (secara vertikal).

Tegangan lentur dan lendutan pertama-tama diperlihatkan untuk balok sebelah kiri, lalu untuk balok sebelah kanan. Perhatikan bahwa momen maksimum di tengah bentang dipotong menjadi dua bagian apabila beban didistribusikan di sepanjang balok dan bukannya terkonsentrasi di satu titik. Ini juga berarti bahwa tegangan lentur dipotong menjadi dua bagian, dari $f = 1.270$ psi untuk beban terpusat menjadi $f = 635$ psi untuk kasus beban merata.

Pada contoh ini, lendutan balok lebih besar untuk balok sebelah kiri, terutama karena tegangan lentur lebih tinggi di balok sebelah kiri daripada tegangan lentur di balok sebelah kanan. Apabila balok yang dibebani secara merata memiliki tegangan lentur yang sama dengan balok sebelah kiri, lendutannya akan bertambah dua kali lipat menjadi 0,20 in., sehingga melebihi lendutan pada kasus beban terpusat.

Latihan

Para pembaca mungkin ingin membuktikan kebenaran dari beberapa rumus perancangan yang berguna untuk momen balok sederhana maksimum dan geser balok sederhana maksimum. Untuk sebuah balok sederhana dengan panjang L, dan dengan beban terpusat tengah bentang P, $V = P/2$, dan $M = PL/4$. Untuk balok sederhana dengan beban merata w, $V = wL/2$ dan $M = wL^2/8$.

Kerjakan kembali soal ini dengan mengasumsikan bahwa balok kayu berukuran 8 × 16 diganti dengan sebuah balok baja berbentuk-I dengan flens-flens berukuran $\frac{1}{2}$ in. × 6-in. dan sebuah jaringan berukuran $\frac{1}{4}$ in. × 16 in., dan asumsikan sebuah bentang baru sepanjang 20 ft. ■

6.5 Lendutan dan Tegangan Balok Lintang Pelat Baja

Balok lintang berbentuk-I baja bentang sederhana sepanjang 15 ft pada Gambar 6.6 menumpu lima beban yang diletakkan seimbang

masing-masing sebesar 30.000 lb. Balok ini bisa saja merupakan sebuah balok lintang jembatan, di mana beban-beban melambangkan reaksi-reaksi balok lantai, atau bisa saja merupakan sebuah balok lintang transfer dari sebuah bangunan, di mana balok lintang menumpu beban-beban kolom dan memungkinkan sebuah ruang bebas-kolom pada tingkatan di bawah balok. Bagian struktur tersebut disebut sebagai balok lintang pelat karena alih-alih dibuat di sebuah pabrik peleburan baja di mana baja panas dicetak menjadi bentuk-I solid dengan pencetakan melalui proses penggilingan (dari sinilah didapatkan istilah bentuk-bentuk yang dirol), penampang melintang berbentuk-I balok lintang difabrikasi dari tiga pelat baja yang terpisah. Dua pelat horisontal berukuran 1 in. × 18 in. di bagian atas dan di bagian bawah disebut flens (*flange*), dan flens-flens ini berfungsi untuk menahan sebagian besar momen lentur. Pelat vertikal berukuran $\frac{1}{2}$ in. × 60 in. disebut jaringan (*web*), dan pelat ini memikul geser balok.

Pelat-pelat disatukan melalui pengelasan siku longitudinal bertempat di sepanjang keempat pojok dari pelat jaringan dan sepanjang penuh dari balok lintang. Seperti diperlihatkan gambar, pengelasan ini harus mampu menahan tegangan geser horisontal pada antarmuka dari pelat jaringan dan pelat-pelat flens. Kita akan mencoba menentukan tegangan geser maksimum pada pengelasan siku sebesar $\frac{5}{16}$ in., tegangan lentur maksimum di tengah bentang, dan lendutan dari balok lintang.

Dari gambar tersebut, kita melihat bahwa geser vertikal (dan geser horisontal) maksimum sama dengan reaksi sebesar 75.000-lb, sehingga tegangan geser maksimum pada jaringan adalah

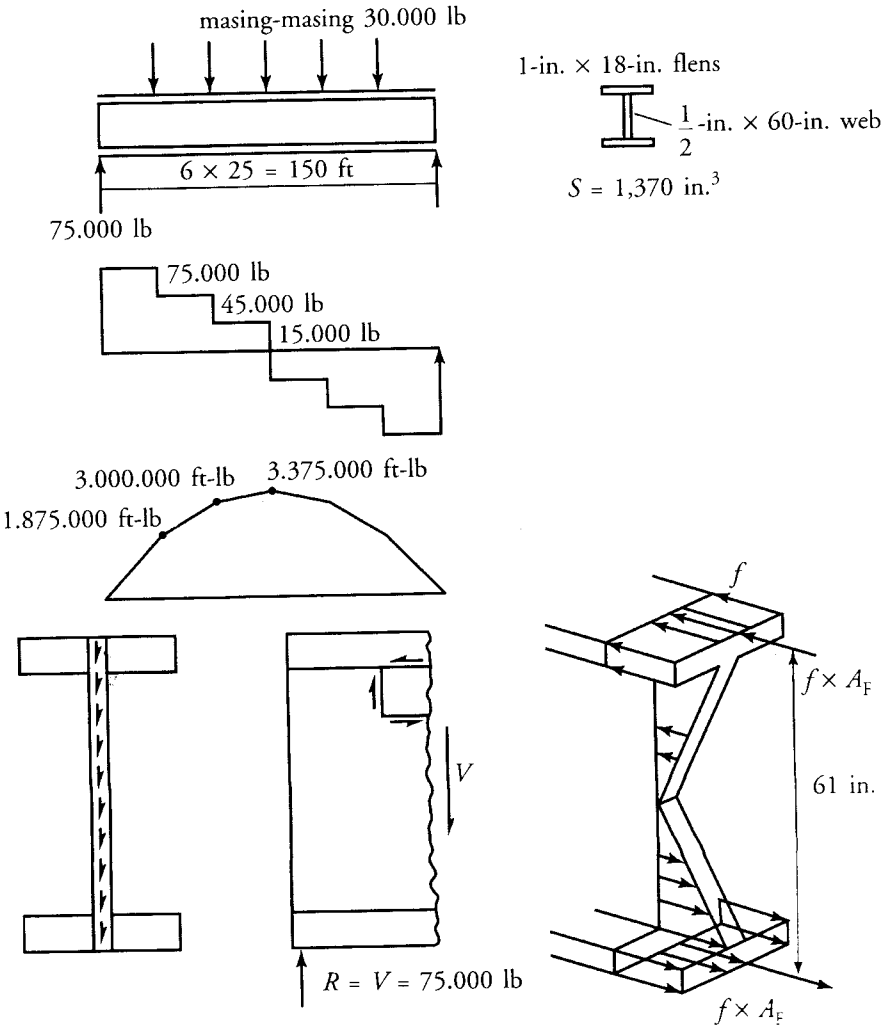
$$fv = \frac{V}{h \times t_w} = \frac{75{,}000}{62 \times \frac{1}{2}} = 2.340 \text{ psi}$$

Kita akan memusatkan perhatian pada sebuah panjang 1 in. dari antarmuka jaringan/flens di dekat tumpuan, di mana tegangan geser maksimum berada. Luas penampang kontak antara pelat jaringan dan pelat-pelat flens antarmuka sepanjang 1 in. ini adalah $\frac{1}{2}$ in. × 1 in = $\frac{1}{2}$ in^2, sehingga sebuah gaya geser satuan sebesar $\frac{1}{2}$ in^2. × 2.340 lb/in^2. = 1.170 lb/in. harus disebar di antara kedua pelat. Karena kedua pengelasan siku memiliki kapasitas gabungan sebesar 2 × 4.000 lb/in. = 8.000 in., maka pengelasan-pengelasan tersebut lebih daripada memadai.

Momen lentur maksimum diperlihatkan sebesar 3.375.000 ft-lb. Dari modulus penampang yang diberikan (di mana Anda harus membuktikan kebenarannya dengan menggunakan prosedur yang diperlihatkan pada Gambar 6.4), kita menghitung tegangan lentur maksimum yang terjadi pada kedua flens menjadi sebesar

$$f = \frac{M}{S} = \frac{3.375.000 \times 12}{1.370} = 29.600 \text{ psi}$$

Tegangan ini dapat diterima untuk baja dengan kuat leleh sebesar 50.000 psi, yang biasanya digunakan untuk balok-balok lintang pelat. Pada gambar, kita melihat distribusi tegangan lentur pada penampang melintang dan kita perhatikan bahwa luas keseluruhan dari flens manapun, A_F, secara praktis diberi tegangan dengan tegangan lentur maksimum penuh. Dengan kedua flens, tegangan flens dikalikan dengan luas flens menghasilkan sepasang gaya kopel yang terpisah oleh sebuah lengan momen yang hampir sama dengan kedalaman balok lintang, seperti yang



GAMBAR 6.6

terlihat pada gambar. Kopel ini menahan mayoritas momen lentur, dengan hanya sedikit jumlah momen lentur yang ditahan oleh jaringan.

Pelat baja tidak terbuat dalam panjang 150 ft, sehingga pelat yang lebih pendek harus diberi pengelasan bawah (*butt weld*) untuk membentuk jaringan balok lintang yang lebih panjang dan flens balok lintang yang panjang. Karena momen lentur tidak dekat dengan ujung-ujung dari balok lintang pelat dan mengingat bahwa titik kumpul bawah (*butt joint*) juga tetap diperlukan, merupakan suatu hal yang umum untuk melihat peralihan ke pelat-pelat flens yang lebih kecil, di mana momen lentur dikurangi. Ini akan mengurangi berat balok lintang dan mengurangi biaya material. Pelat jaringan umumnya dipertahankan ukurannya sepanjang penuh balok lintang.

Lendutan dari balok lintang ini dihitung sebesar

$$D = \frac{f \times L^2}{5 \times E \times h} = \frac{29.600 \times (150 \times 12)^2}{5 \times 30.000.000 \times 62} = 10 \text{ in.}$$

Pada awalnya, nilai ini terlihat sebagai sebuah nilai yang mengkhawatirkan. Namun demikian, apabila sekitar setengah dari beban balok lintang adalah beban mati (yang umumnya terjadi pada kasus struktur-struktur yang besar), maka sekitar 5-7 in. dari lendutan yang terhitung akan diberikan lawan-lendut/kamber (*camber*) pada girder atau balok lintang saat proses fabrikasi. (Kamber adalah kelengkungan ke arah atas dari sebuah balok.) Sekarang, hanya dengan beban mati, tidak ada lendutan, atau bahkan mungkin terdapat kamber sebesar satu atau dua inci.

Penambahan 5 in. dari lendutan beban hidup yang diantisipasi berada dalam standar perizinan untuk bangunan-bangunan sebesar

$$\frac{L}{360} = \frac{150 \times 12}{360} = 5 \text{ in.}$$

Untuk balok-balok lintang jembatan, lendutan beban hidup yang diizinkan adalah $L/800 = 2{,}3$ in., sehingga lendutan pada balok lintang ini berlebihan dan sebuah balok lintang dengan kedalaman yang lebih besar perlu digunakan. Penambahan kedalaman jaringan hingga 70 in. akan menghasilkan modulus penampang baru sebesar

$$S = \frac{I}{\frac{h}{2}} = \frac{\frac{18 \times 72^3}{12} - \frac{17{,}5 \times 70^3}{12}}{\frac{72}{2}} = 1.660 \text{ in}^3$$

Sehingga tegangan lentur yang baru berkurang menjadi

$$f = \frac{M}{S} = \frac{3.375.000 \times 12}{1.660} = 24.400 \text{ psi}$$

Lendutan total juga berkurang sebesar:

$$D = \frac{24.400 \times (150 \times 12)^2}{5 \times 30.000.000 \times 72} = 7{,}3 \text{ in}$$

Apabila setengah dari lendutan ini, 3,7 in., disebabkan oleh beban hidup, maka balok tersebut masih terlalu fleksibel untuk memenuhi persyaratan lendutan beban hidup jembatan yang diizinkan sebesar 2,3 in., dan balok dengan kedalaman yang lebih besar masih diperlukan.

Latihan Berapakah berat balok lintang pelat pada contoh terdahulu?

Misalkan balok lintang baja digantikan dengan balok kayu dengan lebar 12 in. Tegangan lentur yang diizinkan adalah 2.400 psi, dan tegangan geser yang diizinkan adalah 200 psi. Berapakah kedalaman balok yang diperlukan? Berapakah lendutannya?

Apabila setengah dari lendutan yang terhitung disebabkan oleh beban hidup, apakah sebuah jaringan sepanjang 76 in. akan memenuhi batas lendutan jembatan sebesar $L/800$? ■

6.6 Balok Beton yang Diberi Penulangan

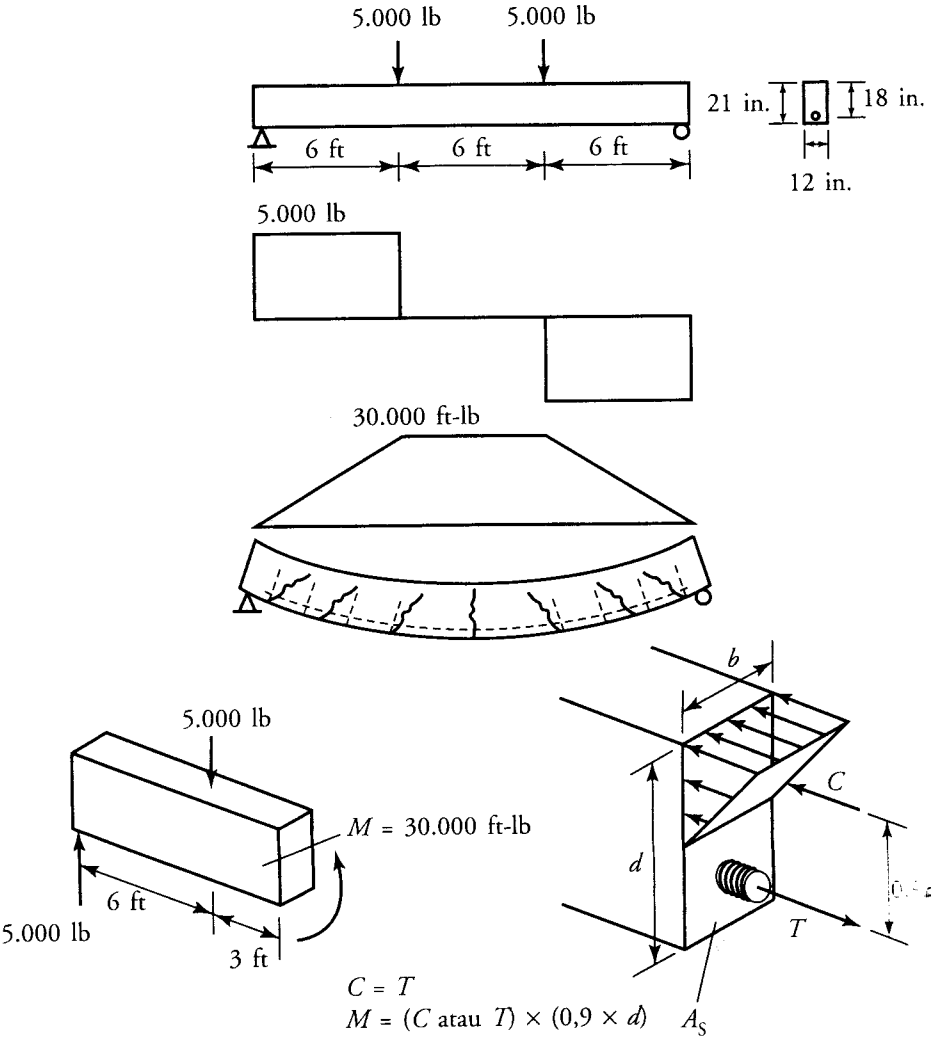
Seperti yang telah kita lihat, apabila balok sesederhana apapun mengalami lentur sebagai respons terhadap beban transversal yang diterapkan padanya, maka balok tersebut akan mengalami tegangan tekan lenturan di atas permukaan netralnya, dan akan mengalami tegangan tarik lenturan di bawah permukaan netralnya. Momen lentur balok akibat beban yang diterapkan ditahan oleh sebuah kopel internal yang dihasilkan oleh gaya tarik serta gaya tekan yang sama dan saling melawan, yang berasal dari tegangan lenturan yang bekerja pada luas penampang melintang balok.

Pada kasus balok beton, tarik di bawah permukaan netral menyebabkan beton menjadi retak, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6.7, sehingga beton ini tidak mampu menghasilkan gaya tarik untuk bergabung dengan gaya tekan di atas permukaan netral. Tulangan baja penulangan longitudinal diletakkan di dekat bagian bawah dari balok beton bertulang menghasilkan apa yang disebut beton yang diberi penulangan. Tulangan-tulangan ini mencegat retak-retak vertikal akibat momen yang tinggi di sepanjang porsi tengah dari bentang. Kita akan melihat nantinya bahwa tulangan vertikal yang lebih kecil, yang disebut sengkung, harus diletakkan di sepanjang ujung balok lintang untuk mencegat retak diagonal yang

disebabkan oleh efek tegangan (*racking*) dari geser yang tinggi. Pada kasus manapun, baja dari beton yang diberi penulangan akan menahan tegangan-tegangan tarik yang tidak dapat ditahan oleh beton biasa tanpa tulang.

Pada persoalan ini, kita hanya memusatkan perhatian pada baja penulangan longitudinal yang disebut tulangan (*rebars*). Momen internal yang menahan kopel dihasilkan oleh gaya irisan tekan C, dan gaya tarik pada tulangan T, dipisahkan oleh sebuah lengan momen. Lengan momen ini biasanya sekitar 90% dari kedalaman efektif balok d, yang merupakan jarak dari serat tekan luar ke bagian tengah baja penulangan.

GAMBAR 6.7



Gaya C adalah resultan dari irisan tegangan tekan lenturan yang bekerja pada luas penampang melintang di atas sumbu netral, dan T adalah gaya tarik pada tulangan baja yang sama dengan tegangan dikalikan dengan luas penampang melintang tulangan A_S, atau $T = f \times A_S$. Kita perlu memastikan bahwa tegangan baja dan beton berada di dalam batas-batas yang diizinkan. Apabila persentase baja pada penampang melintang merupakan persentase yang kecil, seperti yang dapat kita asumsikan pada kasus ini, tegangan baja akan menjadi pusat perhatian kita yang paling utama, dan kita hanya perlu memastikan bahwa tegangan baja adalah di bawah 24.000 psi.

Kita akan mengabaikan berat balok dan melihat pada gambar, bahwa bentang sederhana sepanjang 18 ft tersebut memiliki momen lentur maksimum M = 30.000 ft-lb (360.000 in-lb). Lebar balok, tinggi balok, dan tinggi efektif balok terhadap baja adalah b = 12 in., h = 21 in., dan d = 18 in., seperti yang terlihat pada gambar. Tulangan baja tunggal memiliki luas penampang melintang A_S = 1 in^2. Dengan menyamakan momen-momen internal yang menahan dan momen-momen eksternal yang diterapkan pada penampang melintang balok di mana momen yang diterapkan mencapai sebuah nilai maksimum (pada kasus ini, di sepanjang bagian tengah dengan panjang 6 ft), kita dapat menghitung tegangan maksimum pada baja sebagai berikut:

$$M = T \times (0{,}9 \times d)$$
$$360.000 = (f \times 1) \times (0{,}9 \times 18)$$

Dari perhitungan ini, kita mendapatkan tegangan tarik baja sebesar f = 22.000 psi, yang berada di bawah tegangan yang diizinkan, sehingga balok tersebut bisa dikatakan memadai.

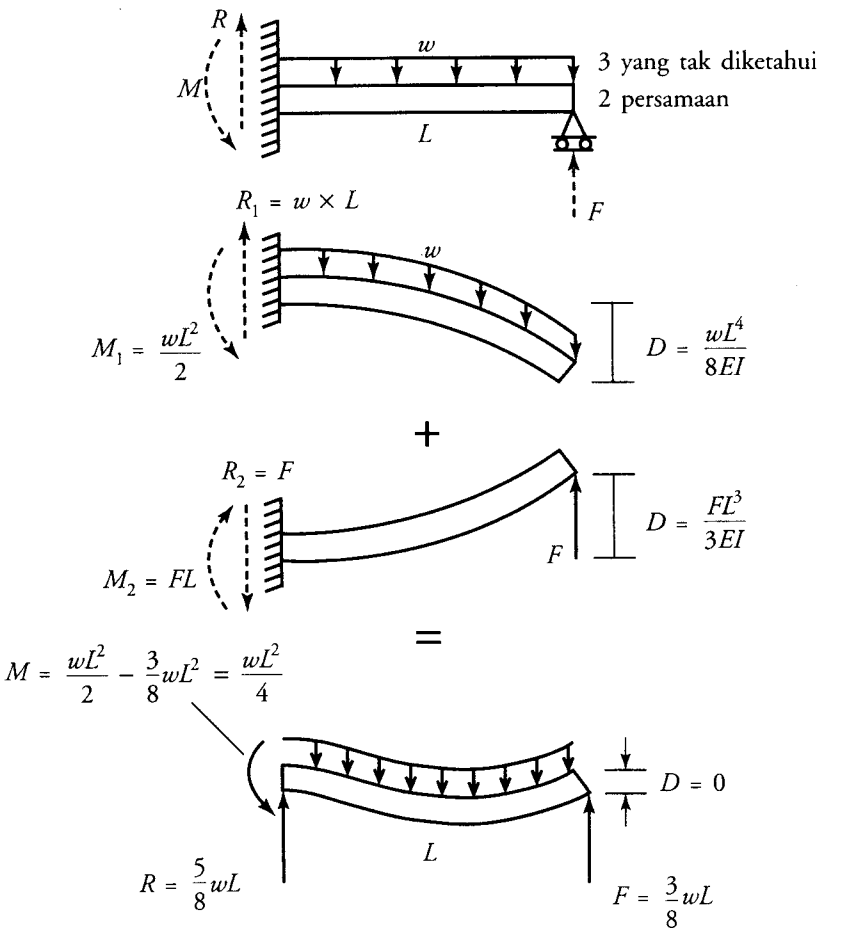
Latihan Asumsikan bahwa tulangan yang sama digunakan hingga mencapai kapasitas tarik penuhnya. Apabila bentang balok sekarang menjadi sepanjang 3 × 8 ft = 24 ft, berapakah kedalaman efektif baru balok yang diperlukan d? ■

6.7 Balok Kantilever yang Disandarkan

Kita mengetahui bahwa terdapat tiga persamaan kesetimbangan yang dapat digunakan untuk menentukan reaksi-reaksi dari struktur-struktur tertentu. Pada sebuah balok tanpa adanya gaya horisontal yang bekerja, terdapat dua persamaan kesetimbangan yang dapat digunakan untuk menyelesaikan dua reaksi tumpuan. Pada kasus balok kantilever, di mana

satu ujung dijepit secara kaku pada sebuah dinding, sedangkan ujung yang lainnya bebas tanpa tumpuan, kedua reaksi tersebut adalah momen dan gaya vertikal pada dinding. Apabila ujung yang bebas dari sebuah balok kantilever disandarkan (*propped up*), seperti yang terlihat pada Gambar 6.8, sebagian dari beban yang ditumpu oleh ujung yang dijepit sekarang dipikul oleh sandaran (tumpuan rol diperlihatkan pada gambar). Reaksi vertikal dari rol menjadi tiga anu yang tak diketahui, namun masih terdapat dua persamaan kesetimbangan, sehingga kita perlu melihat kompatibilitas dari deformasi-deformasi, untuk menghasilkan persamaan ketiga yang perlu kita dapatkan untuk menyelesaikan ketiga reaksi tumpuan.

Coba kita lihat gaya sandar F. Penghilangan reaksi ini menghasilkan sebuah balok kantilever sederhana yang dibebani secara merata, dengan lendutan pada ujung bebasnya dihitung dengan persamaan, seperti yang



GAMBAR 6.8

diperlihatkan pada gambar. Demikian juga, rumus lendutan untuk ujung yang bebas dari sebuah balok kantilever dengan gaya terpusat pada ujung bebasnya juga diperlihatkan pada gambar. Perhatikan bahwa rumus-rumus tersebut secara khusus hanya berlaku untuk kasus-kasus ini saja dan tidak dapat digunakan pada situasi lainnya, seperti kasus lendutan balok sederhana, di mana rumus lainnya telah kita kembangkan.

Karena ujung bebas tersebut tidak mengalami lendutan akibat sandaran tumpuan rol, kita melihat bahwa lendutan ke arah bawah dari beban merata ditiadakan oleh lendutan ke arah atas dari beban terpusat F. Kedua nilai lendutan yang berlawanan tersebut harus sama besarnya, sehingga

$$\frac{w \times L^4}{8 \times E \times I} = \frac{F \times L^3}{3 \times E \times I}$$

Dari hubungan kompatibilitas deformasi ini, kita dapat menyelesaikan satu dari tiga reaksi tumpuan yang tak diketahui

$$F = \frac{3}{8} \times w \times L$$

Sekarang, alih-alih dinding memikul semua beban vertikal yang bekerja pada balok, wL, kita melihat bahwa sandaran tersebut memikul $\frac{3}{8}wL$, atau 37,5% dari beban, dan kesetimbangan gaya vertikal menunjukkan bahwa dinding tersebut sekarang menumpu bagian yang tersisa sebesar $\frac{5}{8}wL$, atau 62,5% dari beban.

Seperti yang bisa kita lihat pada gambar, kita menjumlahkan momen-momen pada dinding untuk menemukan bahwa sandaran tersebut telah mengurangi reaksi momen balok kantilever dari $\frac{1}{2}wL^2$ menjadi $\frac{1}{4}wL^2$. Ujung bebas dari sebuah kantilever akan mengalami sebuah lendutan yang besar, namun bentuk terlendut dari kantilever yang disandarkan memperlihatkan bahwa lendutan tersebut akan menjadi kecil (bahkan lebih kecil daripada lendutan pada sebuah balok sederhana).

Latihan

Buatlah sebuah diagram momen dan sebuah diagram geser, baik untuk balok kantilever maupun untuk balok kantilever yang disandarkan pada persoalan ini, apabila w = 500 plf, dan L = 14 ft.

Apabila sebuah balok kayu selebar 6 in. dengan sebuah tegangan yang diizinkan sebesar 1.200 psi digunakan, berapakah ukuran balok yang dibutuhkan, baik untuk situasi di mana ujung balok bebas, maupun untuk situasi di mana ujung balok disandarkan? ■

7 TEGANGAN GABUNGAN, KOLOM, DAN BALOK-KOLOM

7.1 GABUNGAN TEGANGAN LENTUR DAN AKSIAL

Jarang sekali ditemukan kasus di mana sebuah elemen struktur hanya menumpu beban aksial atau transversal saja. Sebagai contoh, untuk sebuah rangka batang ideal di mana semua bagian strukturnya merupakan bagian struktur dua-gaya, meskipun beban-beban rangka batang diterapkan pada sendi-sendi titik kumpul, namun berat dari semua bagian struktur yang horizontal atau yang miring, bekerja sebagai beban uniform pada elemen struktur tersebut, yang menjadikan elemen struktur ini sebagai balok-kolom. Beban aksial menghasilkan tegangan aksial dan beban transversal menghasilkan tegangan lentur, yang mana keduanya bekerja pada bagian struktur pada saat yang sama. Dalam bab ini, kita akan melihat bagaimana tegangan aksial dan tegangan lentur ini bergabung, dan pada saat yang sama, kita juga menetapkan lokasi titik berat dari sebuah segitiga. Selanjutnya kita akan menggunakan prinsip superposisi dari tegangan-tegangan gabungan untuk mengembangkan rumus balok-kolom.

Sebuah bagian struktur dapat mengalami gaya aksial, selain beban transversal yang menyebabkan terjadinya lenturan. Untuk kasus tarik aksial dan tekan aksial dari bagian-bagian struktur yang pendek dari struktur yang kekar (*stocky*) yang tidak akan mengalami tekuk, kita hanya meletakkan atau menambahkan tegangan aksial, $f = F/A$ dengan tegangan lentur, $f = M/S$. Superposisi dari tegangan dimungkinkan karena baik tegangan aksial maupun tegangan lentur secara serupa bekerja tegak lurus terhadap luas penampang melintang bagian struktur. Jadi, tegangan gabungannya adalah

$$f = \frac{F}{A} + \frac{M}{S}$$

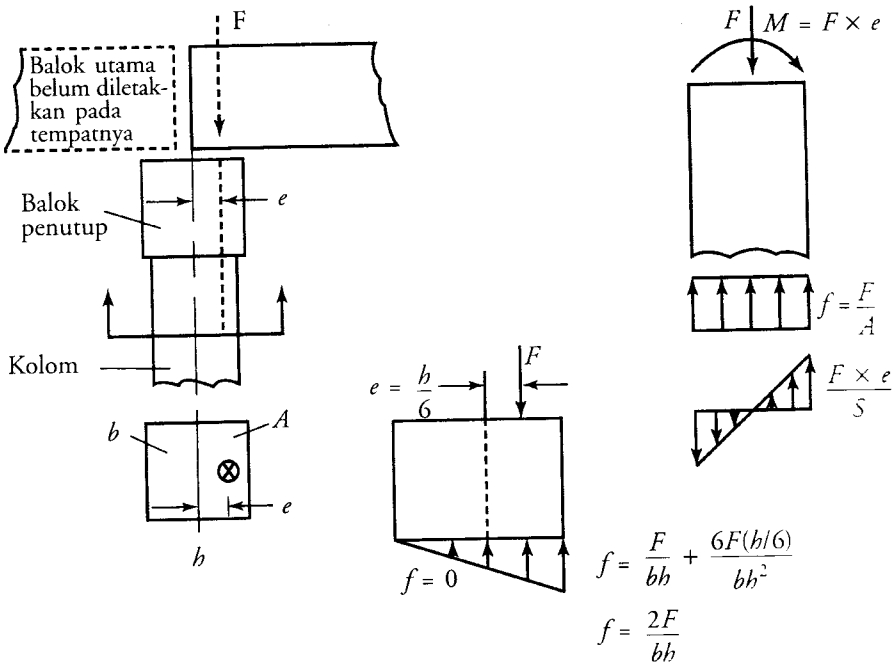
Dalam rumus ini, apabila kita secara sembarang menyatakan bahwa tegangan tarik adalah positif, maka tegangan tekan akan ditinjau negatif—apabila tegangan tarik disebut negatif, maka tegangan tekan disebut positif. Apabila beban aksial berupa tekan, dan bagian struktur cukup panjang

serta cukup ramping hingga perlu diperhatikan kemungkinan terjadinya tekuk, maka bagian struktur ditinjau sebagai sebuah balok-kolom, dan efek-efek kerampingannya memerlukan sebuah analisis yang lebih rumit, seperti akan kita lihat. Prinsip superposisi juga berlaku untuk tekanan dukung lentur dan tegangan aksial yang eksis di antara sebuah balok dan tumpuannya, atau antara bagian bawah struktur dan tanah yang menumpunya.

Gambar 7.1 menggambarkan sebuah kolom jembatan yang relatif pendek dan kekar dengan penampang melintang persegi panjang yang hanya menumpu balok lintang pada sebuah tahap konstruksi. Reaksi dari balok lintang menghasilkan beban eksentris F dengan eksentrisitas e. Kita melihat bahwa gaya ini menyebabkan tekan aksial dan menghasilkan sebuah momen, $M = F \times e$, yang terkait dengan sumbu netral. Kita dapat menggantikan gaya eksentris tersebut secara ekuivalen dengan aksi-aksi terpisahnya yang terdiri dari sebuah gaya ditambah sebuah momen, seperti yang terlihat pada gambar. Tegangan aksial merata dari gaya sentris adalah $f = F/A$, dan tegangan lentur dari momen adalah $f = (F \times e)/S$. Dengan menggunakan rumus tegangan gabungan dan mengingat bahwa $S = bh^2/6$

$$f = \frac{F}{b \times h} + \frac{6 \times F \times e}{b \times h^2}$$

GAMBAR 7.1



Anggaplah gaya memiliki sebuah eksentrisitas $e = h/6$; dengan kata lain, merupakan sepertiga dimensi, h, dari tepi yang terdekat. Dari persamaan di atas, kita melihat bahwa kedua komponen tegangan memiliki nilai-nilai yang sama apabila $e = h/6$. Pada tepi yang dekat, tegangan pada penampang melintang merupakan tegangan tekan dan sama dengan dua kali lipat tegangan aksial merata dari beban sentris, yang juga merupakan tegangan rata-rata pada penampang melintang. Pada tepi yang jauh, kita melihat bahwa komponen pertama adalah tegangan tekan, dan komponen kedua adalah tegangan tarik, sehingga tegangan-tegangan tersebut saling meniadakan satu dengan yang lainnya, dan tegangan pada tepi penampang melintang ini adalah nol. Jadi, sebuah irisan tegangan berbentuk segitiga dihasilkan pada penampang melintang yang sama dengan gaya F.

Jadi, telah dibuktikan kebenaran dari apa yang sering dinyatakan sebelumnya, bahwa resultan dari sebuah distribusi tegangan berbentuk segitiga secara efektif bekerja pada titik berat segitiga yang terletak sejauh sepertiga jarak dari sisi dengan tegangan maksimum. Apabila eksentrisitas dari sebuah gaya lebih kecil daripada $h/6$, gaya bekerja di dalam sepertiga dari tengah (*middle third*) penampang melintang ($2 \times \frac{1}{2} = \frac{1}{3}$), dan penampang melintang keseluruhan akan berada dalam tekan. Apabila $e > h/6$, baik tegangan tekan maupun tegangan tarik akan terjadi pada penampang melintang.

Misalkanlah sebuah gaya $F = 50.000$ lb bekerja dengan eksentrisitas sebesar 2,5 in. pada kolom berukuran 10 in. × 10 in. Apakah beton akan mengalami retak dalam tarik pada tepi yang jauh?

Beton memiliki kuat tarik sekitar 500 psi. Tegangan sentrisnya adalah

$$\frac{F}{A} = \frac{50.000}{10 \times 10} = 500 \text{ psi}$$

Tegangan geser adalah

$$\frac{F \times e}{S} = \frac{50.000 \times 2{,}5}{\frac{10 \times 10^2}{6}} = 750 \text{ psi}$$

Jadi, pada ujung penampang melintang yang paling dekat dengan beban tegangan tekan adalah

$$f = 500 + 750 = 1.250 \text{ psi}$$

Untuk tegangan pada ujung penampang yang jauh,

$$f = 500 - 750 = -250 = 250 \text{ psi (tarik)}$$

Tegangan tarik ini di bawah 500 psi sehingga tegangan tersebut tidak cukup besar untuk dapat menyebabkan terjadinya retak. Perhatikan bahwa

ketika balok utama kedua diletakkan pada tempatnya, kedua beban akan menghasilkan sebuah gaya sentris ekivalen tunggal F = 100.000 lb, yang menghasilkan sebuah tegangan rata-rata uniform sebesar

$$f = \frac{100.000}{10 \times 10} = 1.000 \text{ psi}$$

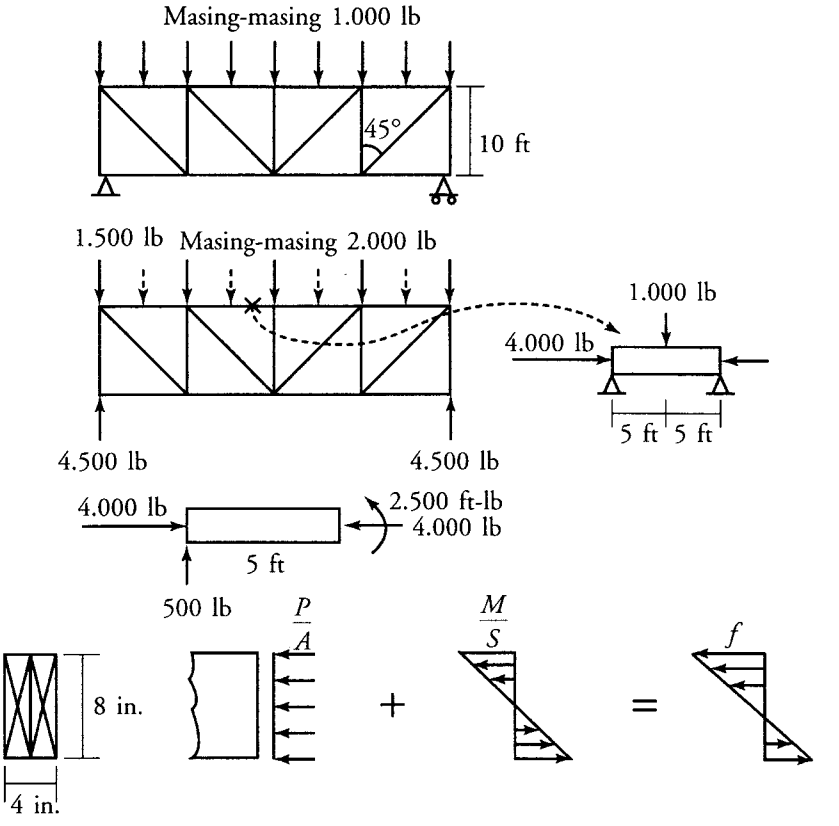
Sehingga kita mendapatkan pengetahuan bahwa kolom sebenarnya lebih diberi tegangan dengan satu balok utama yang tak terletak persis di tengah/*off-centered* (f = 1.250 psi) daripada diberi tegangan dengan dua balok utama di tengah untuk menghasilkan sebuah beban sentris.

7.2 Rangka Batang yang Dibebani Transversal

Sebuah sistem atap menggunakan rangka batang kayu paralel sederhana dengan beban masing-masing sebesar 1.000 lb seperti diperlihatkan pada Gambar 7.2. Kita ingin mengetahui tegangan-tegangan aksial gabungan pada bagian-bagian batang atas bagian tengah. Bagian-bagian struktur ini terbuat dari dua papan utuh berukuran 2 in. × 8 in. dan diberi pengekangan pada ujung-ujungnya dan di tengah bentang sehingga bagian-bagian struktur tersebut tidak akan mengalami tekuk seperti halnya yang terjadi pada kolom-kolom ramping (analisis mengenai tekuk pada kolom akan segera dibahas). Tegangan yang diizinkan adalah 1.000 psi. Karena sebuah rangka batang diasumsikan dibebani hanya pada titik kumpul, maka untuk melakukan analisis rangka batang dan menentukan tekan aksial pada batang atas, beban-beban yang bekerja secara transversal ke batang-batang atas secara sama terbagi rata ke titik-titik kumpul bagian struktur yang terdekat, seperti yang terlihat pada gambar. Analisis rangka batang yang dihasilkan menunjukkan bahwa tekan pada bagian struktur ini adalah 4.000 lb.

Kita selanjutnya meninjau bagian struktur batang atas yang terpisah dan memperlakukannya sebagai sebuah balok-kolom, di mana momen lentur dan beban aksial gabungan akan menjadi kritis pada bagian tengah bagian struktur, seperti yang terlihat pada gambar. Tegangan gabungan maksimum pada bagian struktur adalah jumlah dari tegangan-tegangan tekan pada serat-serat atas dari bagian struktur:

$$f = \frac{F}{A} + \frac{M}{S} = \frac{4.000}{2 \times (2 \times 8)} + \frac{2.500 \times 12}{\frac{4 \times 8^2}{6}} = 125 + 703 = 828 \text{ psi}$$



GAMBAR 7.2

Karena tegangan ini besarnya di bawah tegangan yang diizinkan sebesar 1.000 psi, bagian struktur tersebut dikatakan memadai. Tegangan tarik pada serat-serat bawah dihitung sebesar

$$f = 703 - 125 = 588 \text{ psi}$$

Latihan Kerjakan kembali soal ini dengan mengasumsikan bahwa kedalaman rangka batang hanya 6 ft, dan bukan 10 ft. ■

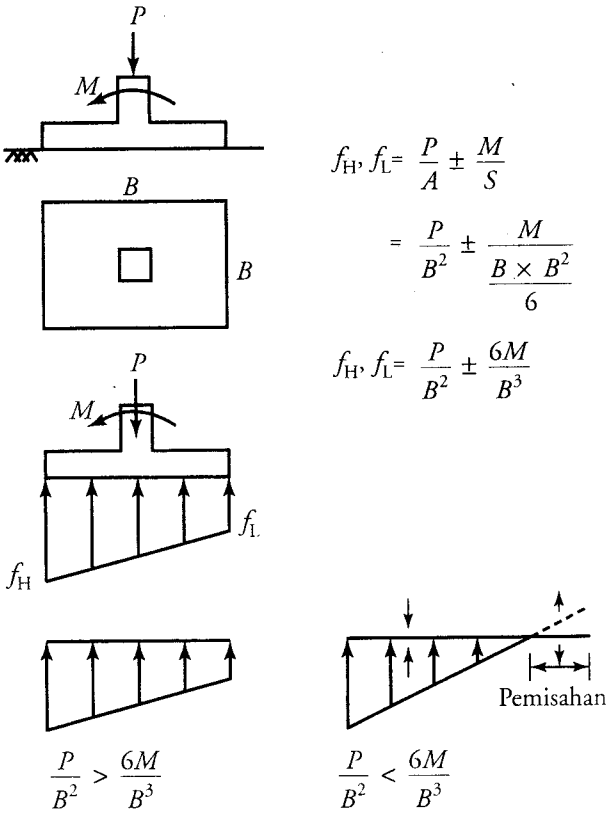
7.3 Distribusi Tegangan tidak Merata di Bawah Pengkakian

Seperti sudah kita lihat pada contoh soal yang lain, bagian bawah struktur (*footing*) bertujuan untuk menyebarkan beban-beban dari sebuah struktur ke daerah yang cukup besar dengan tekanan kontak antara bagian bawah

dari pengkakian dan tanah yang cukup rendah, sehingga tanah dapat menahan beban-beban tersebut dengan memadai. Tegangan kontak biasanya disebut dalam satuan *pounds* per ft^2. Sebagai contoh, tekanan kontak yang diizinkan untuk sebuah pengkakian dengan muka sederhana pada tanah lempung adalah sekitar 1.000 psf hingga 3.000 psf.

Semua beban struktur sejauh mungkin dibenamkan ke dalam tanah melalui beberapa jenis pondasi, umumnya dengan pengkakian yang menyebar secara persegi. Seringkali, beban-beban yang akan dibenamkan mencakup sebuah gaya aksial dan sebuah momen, seperti yang terlihat pada Gambar 7.3. Kita ingin menentukan hubungan antara ukuran pengkakian persegi, momen, dan gaya yang diterapkan, serta distribusi tekanan di bawah pengkakian. Pengkakian berukuran $B \times B$ dan menumpu beban aksial P serta momen M, seperti terlihat pada gambar.

Luas kontak antara tanah dan dasar pengkakian pada dasarnya dapat ditinjau sebagai hal yang sama seperti halnya sebuah penampang melintang balok yang mengalami tegangan tekan aksial gabungan, $f = P/A$, dan tegangan lentur, $f = M/S$. Tegangan-tegangan gabungan



$$f_H, f_L = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{S}$$

$$= \frac{P}{B^2} \pm \frac{M}{\frac{B \times B^2}{6}}$$

$$f_H, f_L = \frac{P}{B^2} \pm \frac{6M}{B^3}$$

$$\frac{P}{B^2} > \frac{6M}{B^3} \qquad \frac{P}{B^2} < \frac{6M}{B^3}$$

GAMBAR 7.3

sebenarnya merupakan tekanan kontak antara pengkakian dan tanah. "Penampang melintang" memiliki luas, $A = B^2$, dan sebuah modulus penampang $S = (B \times B^2)/6 = B^3/6$. Seperti yang diperlihatkan pada gambar, dengan menggunakan persamaan tegangan gabungan yang sebelumnya telah dihasilkan, persamaan tegangan gabungan untuk kasus ini menunjukkan bahwa tegangan kontak tertinggi dan tegangan kontak terendah adalah

$$f_{\text{Tertinggi}},\ f_{\text{Terendah}} = \frac{P}{B^2} \pm \frac{6 \times M}{B^3}$$

Selama suku pertama dari kedua suku ini lebih besar, luas keseluruhan di bawah pengkakian akan berada dalam keadaan kontak dengan sebuah tekanan kompresif yang melintangi keseluruhan dasar pengkakian, seperti terlihat pada gambar. Apabila suku kedua lebih besar dari suku pertama, maka akan terjadi hilangnya kontak antara pengkakian dan tanah, karena kedua bahan ditarik saling menjauhi oleh "tegangan tarik" gabungan yang diperlihatkan pada gambar dengan sebuah garis putus-putus. Kaki-kaki biasanya memiliki ukuran yang sedemikian rupa untuk menghindari situasi seperti ini, dengan memastikan bahwa reaksi vertikal terletak di dalam sepertiga dari tengah dasar (alas), seperti yang telah dinyatakan sebelumnya.

Latihan Apabila $B = 8$ ft dan tekanan tanah yang diizinkan adalah 4.000 psf, berapakah momen lentur tertinggi yang dapat bekerja dengan beban aksial, 150.000 lb, tanpa menyebabkan pemisahan pada bagian tumit dari pengkakian? ■

7.4 Tekuk pada Kolom-kolom Lurus Ramping

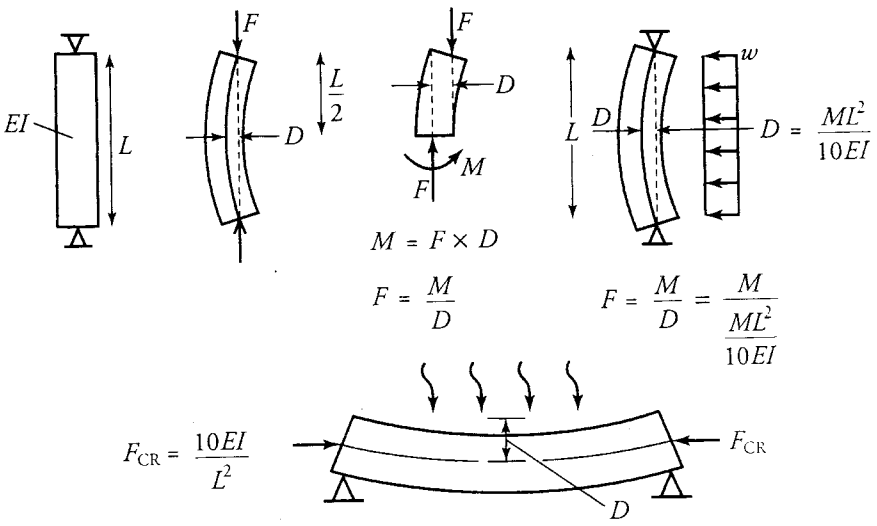
Sekarang, kita telah siap untuk melihat efek dari gaya tekan aksial terhadap elemen struktural lurus yang ramping, yang umum dikenal sebagai kolom. Seperti yang telah dinyatakan dalam beberapa subbab terdahulu, bagian struktur macam ini rentan mengalami kegagalan akibat tekuk lateral.

Ketika sebuah bagian struktur dua-gaya, seperti elemen struktur rangka batang, berada dalam tarik, gaya-gaya ujung cenderung meluruskan elemen struktur tersebut karena gaya-gaya tersebut menyebabkan perpanjangan aksial. Sebaliknya, apabila gaya-gaya ujung menekan anggota struktur, maka elemen struktur berada dalam tekan, dan selain mengalami deformasi aksial yang memperpendek elemen struktur, apabila bagian struktur tersebut cukup ramping, maka bagian struktur juga cenderung mengalami lendutan lateral ke arah luar, seperti diperlihatkan pada

Gambar 7.4. Apabila beban tekan yang cukup besar diterapkan pada sebuah yang tinggi struktur yang ramping (bagian struktur ramping dengan rasio panjang terhadap luas penampang melintang yang tinggi), maka beban tersebut dapat menyebabkan kegagalan tekuk pada beban struktur. Untuk mencegah agar hal ini tidak terjadi, elemen-elemen struktur tekan harus memiliki kekakuan substansial $E \times I$, dan elemen-elemen struktur tersebut memerlukan penampang melintang kekar yang lebih besar dibandingkan dengan bagian-bagian struktur tarik yang dibebani secara sama.

Istilah kolom biasanya mengacu pada sebuah bagian struktur vertikal yang menumpu beban dari atas dan mengarahkannya menuju pondasi, walaupun bagian-bagian struktur tekan horizontal, seperti batang atas dari rangka-rangka batang sederhana, juga diperlakukan sebagai kolom. Anda melihat kolom-kolom vertikal di segala tempat menumpu jembatan, atap, lantai atas bangunan, dan lain sebagainya. Mungkin saja Anda saat ini sedang bersandar pada sebuah kolom ketika membaca buku ini. Ketika beban transversal atau kopel-kopel momen yang diterapkan terjadi bersama-sama dengan sebuah gaya tekan aksial, bagian struktur harus dianalisis sebagai sebuah balok-kolom, seperti yang akan kita lihat nanti pada subbab-subbab berikutnya.

GAMBAR 7.4



F_{CR} menahan balok pada lendutan D dengan w dihilangkan

Sebuah "kolom murni" adalah kolom yang benar-benar lurus dan hanya memiliki gaya-gaya ujung tekan aksial sentris. Tidak ada beban lain yang diterapkan. Kolom seperti ini jarang ditemukan pada struktur-struktur nyata, namun dengan mempelajari perilaku kolom-kolom ini, kita akan mendapatkan pemahaman mengenai tekuk pada kolom. Karena kolom-kolom sesungguhnya jarang memiliki bentuk yang lurus, jarang menumpu beban yang benar-benar terpusat, dan biasanya tidak terlalu ramping, kita nantinya harus meninjau analisis yang lebih kompleks atas kolom-kolom seperti ini.

Ketika beban aksial yang bertambah diterapkan pada sebuah kolom murni dengan sambungan-sambungan ujung sendi, maka pemindahan lateral sekecil apapun yang diterapkan dari sebuah gaya lateral akan menghilang ketika gaya dihilangkan—hingga tingkatan beban aksial kritis dicapai. Ketika beban kritis telah dicapai, pemindahan lateral apapun yang terjadi tidak akan menghilang apabila gaya lateral dihilangkan. Pada beban kritis, pemindahan lateral ini bahkan dapat terjadi tanpa terlihat adanya gangguan lateral. Ini disebut *tekuk pada kolom*. Ketika kolom bisa saja mempertahankan kesetimbangan dalam sebuah bentuk yang mengalami tekuk akibat beban kritis, pertambahan beban sebesar apapun akan menyebabkan pemindahan lateral yang tak terbatas (*unbounded*) sehingga terjadilah sebuah kegagalan tekuk.

Kita lihat pada gambar bahwa sebuah kolom dengan sambungan-sambungan ujung sederhana yang disendi dan memiliki panjang L mengalami tekan akibat gaya F. Ketika bagian struktur kolom berada dalam kesetimbangan dengan sebuah lendutan lateral, kolom tersebut mengalami tegangan lentur internal dari momen yang didistribusikan di sepanjang struktur sama seperti halnya untuk sebuah balok sederhana yang mengalami lendutan, yang menumpu sebuah beban terdistribusi transversal seperti terlihat pada gambar. Sebelumnya kita telah menentukan bahwa lendutan balok sederhana D ini, yang terjadi dengan momen lentur M, kira-kira adalah

$$D = \frac{M \times L^2}{10 \times E \times I}$$

Penampang dari setengah bagian kolom yang mengalami tekuk memperlihatkan bahwa sebuah momen lentur, $M = F \times D$, terjadi pada bagian struktur dan disebabkan oleh gaya tekan aksial F yang bekerja dengan sebuah lengan momen D. Sehingga kita dapat menyatakan bahwa

$$D = M/F$$

Dengan menerapkan kesetimbangan momen pada penampang kolom, kita menyamakan kedua rumus sebelumnya, sehingga

$$f_{CR} = \frac{10 \times E \times I}{L^2}$$

Rumus pendekatan ini menghasilkan beban tekuk kritis, F_{CR}, yaitu beban tekan terbesar, F, di mana sebuah kolom lurus yang ramping, yang dibebani secara sentris dengan panjang L, dan kekakuan $E \times I$, tidak akan mengalami kegagalan akibat tekuk. Apabila $F > F_{CR}$, momen yang diterapkan akibat lendutan lateral, $M = F \times D$, akan melebihi kemampuan bagian struktur kolom menahan momen elastis internal, dan kolom akan mengalami lendutan lateral yang tak dapat dikendalikan, yang pada akhirnya akan menyebabkan keruntuhan tekuk. Apabila kita menggantikan angka 10 pada rumus dengan π^2 (9,87), kita mendapatkan rumus tekuk kolom eksak secara matematis yang ditemukan oleh Leonhard Euler pada tahun 1700–an dengan menggunakan pendekatan matematis yang jauh lebih rumit.

Rumus tersebut hanya benar-benar dapat diterapkan pada kolom-kolom panjang yang ramping, yang mengalami tekuk oleh beban aksial yang cukup rendah sehingga berada dalam tingkatan-tingkatan tegangan aksial yang rendah. Kita menentukan tegangan tekuk kritis ini sebagai

$$f_{CR} = \frac{F_{CR}}{A} = \frac{10 \times E \times I}{L^2 \times A} = \frac{10 \times E}{(L/r)^2}$$

Suku r adalah sebuah besaran penampang melintang yang baru, yang disebut jari-jari girasi dan didefinisikan sebagai

$$r = \sqrt{I/A}$$

Istilah L/r terlihat sebagai sebuah parameter yang tak memiliki satuan, yang disebut rasio kerampingan kolom. Ketika L/r bertambah, f_{CR} dan juga F_{CR} harus berkurang. Istilah kolom yang ramping menunjukkan sebuah kolom dengan nilai L/r yang besar, sedangkan istilah kolom yang kekar menunjukkan sebuah kolom dengan nilai L/r yang kecil.

Kolom-kolom yang kekar memikul beban-beban yang lebih besar dibanding kolom-kolom ramping, karena kolom-kolom yang kekar sebenarnya tidak mengalami tekuk. Alih-alih, kolom-kolom yang kekar akan mengalami kegagalan karena hancur ketika tegangan tekan aksial kritis, $f_{CR} = F_{CR}/A$, berlebihan untuk bahan kolom. Jadi, terdapat hubungan yang berbeda antara tegangan kritis dan kerampingan kolom untuk kolom-kolom yang relatif kekar, dibandingkan dengan hubungan antara tegangan kritis dan kolom-kolom yang ramping. Untungnya, terdapat suatu rumus yang menghubungkan f_{CR} dan L/r untuk semua panjang dari kolom dengan penampang melintang yang diketahui, seperti akan segera kita lihat.

Apabila sebuah penampang melintang kolom tidak berada dalam arah lebar dan arah tinggi yang sama, bagian struktur kolom tersebut cenderung mengalami tekuk di sekitar sumbu netral yang memiliki nilai terkecil dari momen inersia, I. Sebagai contoh, sebuah meteran kayu akan mengalami tekuk di sekitar sumbu netral yang bergerak secara paralel dengan dimensi penampang melintang yang lebih lebar dari meteran kayu tersebut. Balok-balok berbentuk-I akan mengalami tekuk di sekitar sumbu yang bergerak di sepanjang garis tengah dari jaringan.

Kolom aktual pada struktur tidak selalu disambung-sendi di ujung-ujung kolomnya, di mana pada kasus seperti ini, kita menggantikan panjang bagian struktur L dengan panjang tekuk efektif antara lokasi sendi-sendi efektif, di mana momen adalah nol. Untuk kolom-kolom yang dijepit di dasar dan bebas di atas, seperti sebuah menara air tunggal atau beberapa jenis pilar jembatan, panjang efektif kolom-kolom tersebut menjadi dua kali lipat. Apabila kolom secara total diberi pengekangan di kedua ujungnya, panjang efektif kolom adalah setengah dari panjang aktual. Namun demikian, untuk banyak situasi yang melibatkan analisis dan desain, kolom dapat ditinjau memiliki sambungan-sambungan sendi sederhana pada kedua ujung kolom-kolom itu, dan panjang efektif kolom-kolom tersebut sama dengan panjang aktual L dari kolom-kolom tersebut.

Untuk sebuah contoh klasik mengenai kolom ramping, berapakah beban aksial yang menyebabkan tekuk pada sebuah meteran kayu berukuran 1 in. $\times$ $\frac{1}{8}$ in. dengan E = 1.600.000 psi? Momen inersia kritis adalah

$$I = \frac{1}{12} \times 1 \times \left(\frac{1}{8}\right)^3 = 0.000163 \text{ in}^4$$

Dari rumus tekuk kolom, kita menemukan

$$F_{CR} = \frac{10 \times 1.600.000 \times 0{,}000163}{36^2} = 2 \text{ lb}$$

Apabila kita menjepit kedua ujung meteran dalam genggaman tangan kita dan menekan meteran tersebut, panjang efektifnya adalah $\frac{1}{2} \times 36$ in., dan $F_{CR} = 4 \times 2 = 8$ lb.

7.5 Penambahan Beban Tekuk pada Sebuah Kolom Berongga

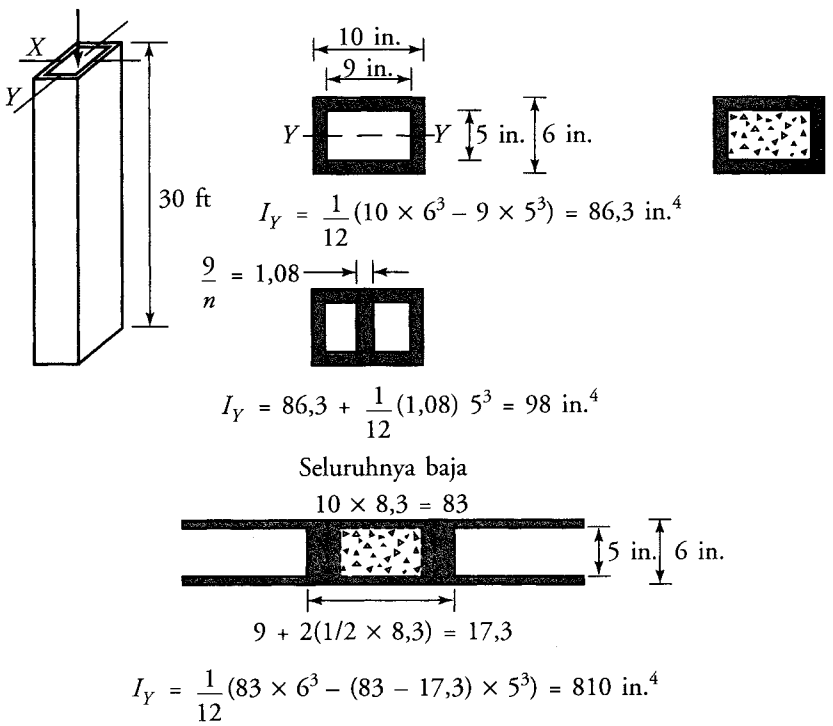
Anggaplah sebuah penampang tabung baja persegi panjang yang berongga digunakan sebagai sebuah kolom panjang yang ramping, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7.5. Berapakah persentase penambahan

beban tekuk kritis yang dihasilkan dengan mengisi beton ke dalam tabung dan menjadikan bagian struktur tersebut sebagai bagian struktur komposit?

Karena tabung persegi panjang yang berongga memiliki sebuah momen inersia yang berbeda di sekitar sumbu X dan sumbu Y dari tabung tersebut, maka pertama-tama tabung akan mengalami tekuk di sekitar sumbu dengan momen inersia yang terkecil, sehingga momen inersia kritis $I_Y = 86{,}5$ in^4. seperti yang terlihat pada gambar. Beban tekuk dari tabung bajanya saja adalah

$$F = \frac{10 \times E \times I}{L^2} = \frac{10 \times 30.000.000 \times 86{,}3}{(30 \times 12)^2} = 200.000 \text{ lb}$$

Ketika tabung diisi dengan beton, tekuk akan tetap terjadi di sekitar sumbu Y yang lebih lemah, namun nilai I_Y telah bertambah. Pada kasus-kasus di mana dua bahan membentuk bagian struktur komposit, kita seringkali mentransformasi satu dari bahan-bahan tersebut menjadi ekuivalen secara struktural dengan bahan yang lainnya, dan kemudian



GAMBAR 7.5

menganalisis bahan bagian struktur tersebut seakan-akan berasal dari satu bahan saja. Transformasi ini dilakukan dengan menggunakan rasio modulus-modulus elastisitas dari tiap-tiap bahan, disebut rasio modular, n. Pada kasus mengenai baja dan beton, n diberikan sebesar

$$n = \frac{E_S}{E_C} = \frac{30.000.000}{3.600.000} = 8{,}3$$

Sebelumnya, ketika kita melihat bagian struktur komposit, kita memperhatikan bahwa bagian struktur tersebut membentuk elemen struktur tak tentu, suatu analisis yang memerlukan persamaan ekstra yang didasarkan atas kompatibilitas deformasi. Ketika baja dan beton bekerja sebagai satuan komposit, deformasi-deformasinya haruslah sama. Rasio modular n = 8,3 menunjukkan bahwa kekakuan elastis dari baja lebih dari delapan kali lipat kekuatan elastis beton, sehingga satu inci persegi dari baja memikul tegangan lebih dari delapan kali lipat tegangan pada satu inci persegi beton.

Untuk menghitung momen inersia dari daerah yang mengalami transformasi di sekitar sumbu dengan menggunakan rasio modular kita memperkecil atau memperbesar luasan dari bahan yang mengalami transformasi dalam arah sumbu tersebut. Penampang-penampang yang mengalami transformasi dan momen-momen inersia, I_Y, diperlihatkan untuk kasus penampang baja dan beton saja. Perhatikan bahwa nilai $E \times I$ adalah sama, baik untuk bagian struktur beton yang mengalami transformasi maupun bagian struktur baja yang mengalami transformasi:

$$3.600.000 \times 810 = 30.000.000 \times 98 = 2.900.000.000 \text{ lb-in}^2$$

Jadi, beban tekuk untuk kolom komposit adalah

$$F = \frac{10 \times E \times I}{L^2} = \frac{10 \times 2.900.000.000}{(30 \times 12)^2} = 224.000 \text{ lb}$$

Dengan menambahkan beton ke kolom tabung baja yang berongga beban tekuk bertambah sekitar 12% dari 200.000 lb menjadi 224.000 lb. Perhatikan bahwa beban ini adalah beban ultimat yang mungkin dapat ditumpu oleh kolom yang ramping, dan beban tersebut tidak menggunakan faktor keamanan (*safety factor*).

Latihan

Berapakah besar beban tekuk apabila kita menambah tinggi kolom menjadi dua kali lipat lebih tinggi?

Kerjakan kembali soal ini dengan menggunakan nilai E dari sebuah beton dengan kekuatan yang lebih tinggi, E = 5.000.000 psi. ■

7.6 KOLOM YANG DIBEBANI EKSENTRIS DAN KURVA-KURVA KOLOM

Apabila Anda tidak begitu tertarik dengan penurunan rumus secara teoretis, Anda bisa memilih untuk melewatkan bahasan penurunan ini dan berlanjut ke pembahasan mengenai tegangan tekan yang diizinkan versus kurva-kurva kerampingan kolom, seperti yang terlihat pada Gambar 7.7. Penurunan yang menyebabkan pengembangan dari kurva-kurva yang penting ini dirasakan bermanfaat, terutama karena hanya ada beberapa buku saja yang menunjukkan persamaan tunggal yang dapat digunakan untuk menghubungkan tegangan-tegangan (atau beban-beban) tekan yang diizinkan di sepanjang kisaran penuh dari rasio-rasio kerampingan kolom (atau panjang kolom).

Kita telah membahas bahwa tegangan tekuk kritis untuk kolom ramping $f_{CR} = 10E/(L/r)^2$, dan tegangan kritis untuk kolom kekar, f_{CR}, tidak terlalu sensitif terhadap L/r ketimbang terhadap tegangan hancur bahan. Kebanyakan kolom yang nyata merupakan kolom-kolom yang berada di antara kedua kondisi ini. Kita ingin menurunkan sebuah rumus tunggal yang menghubungkan tegangan kolom kritis dengan kerampingan kolom, yang nantinya akan membantu kita dalam menganalisis dan mendesain bagian-bagian struktur tekan. Pada Gambar 7.6, kita melihat sebuah kolom yang disendi dengan beban, $F < F_{CR}$, memiliki eksentrisitas e yang berhubungan dengan garis tengah kolom di panjang-tengah kolom. Eksentrisitas disebabkan oleh ketidaklurusan (*crookedness*) awal kolom yang akan dialami oleh elemen-elemen struktur yang nyata. Eksentrisitas juga dapat disebabkan oleh peletakan beban yang tak persis di tengah, yang juga merupakan sesuatu yang biasa terjadi di dunia nyata.

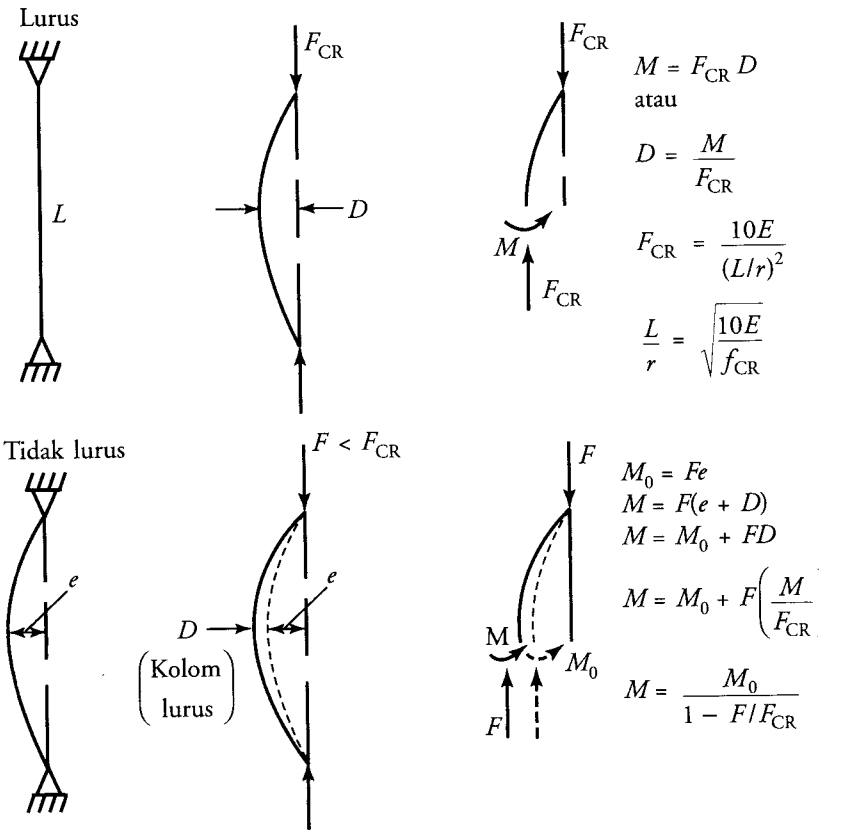
Penerapan pertama dari beban menghasilkan momen awal tengah-kolom

$$M_0 = F \times e$$

Momen ini menyebabkan terjadinya lendutan, D, dan menambah pemindahan lateral kolom, yang pada gilirannya menyebabkan sebuah momen yang bertambah, M, pada saat lengan momen F bertambah besar dari e menjadi $(e + D)$, di mana pemindahan-pemindahan lateral menjadi stabil. Agar stabilisasi dari pemindahan lateral ini terjadi, kapasitas momen elastis dari bagian struktur kolom haruslah tidak berlebihan akibat momen tengah-kolom yang diperbesar

$$M = M_0 + F \times D$$

Momen kolom awal, M_0, bertambah sebesar $F \times D$, yang dikenal sebagai "efek $P - \Delta$" (banyak buku menggunakan suku P ketimbang F dan menggunakan suku Δ ketimbang D). Kedua istilah dari momen yang



$$f_{maks} = \frac{F}{A} + \frac{M}{S} = \frac{F}{A} + \frac{F\left(\frac{1}{2}eh\right)}{I}\left(\frac{1}{1 - F/F_{CR}}\right) = f_{CR}\left(1 - \frac{\frac{1}{2}eh/r^2}{(1 - F/F_{CR}}\right.$$

$$\frac{L}{r} = \sqrt{\frac{10E}{f_{CR}} - \frac{10E\left(\frac{1}{2}eh/r^2\right)}{f_{maks} - f_{CR}}}$$

GAMBAR 7.6

diperbesar M menunjukkan bagian struktur merespons sebagai balok terhadap efek-efek momen lentur akibat eksentrisitas beban, M_0, dan sebagai kolom yang lurus terhadap efek tekuk $P - \Delta$, $F \times D$. Apabila tidak terdapat eksentrisitas ($M_0 = 0$), kita telah melihat bahwa beban maksimum yang mungkin berada dalam kesetimbangan dengan sebuah kapasitas momen tengah-kolom M, akan merupakan beban tekuk kritis kolom yang lurus, $F = F_{CR}$, dan sebuah lendutan $D = M/F_{CR}$. Apabila kita mensubstitusikan nilai ini untuk D ke dalam persamaan momen yang diperbesar, kita mendapatkan

$$M = M_0 + \frac{F \times M}{F_{CR}}$$

Dengan menyusun kembali persamaan ini, maka didapatkan rumus berikut untuk momen yang diperbesar

$$M = \frac{M_0}{1 - F/F_{CR}}$$

Hubungan ini menunjukkan bahwa momen eksentrisitas awal bertambah besar ketika beban aksial pada sebuah bagian struktur mendekati beban tekuk kritis dari elemen struktur tersebut. Apabila beban F sama dengan F_{CR}, momen awal M_0 akan bertambah besar sampai nilai M mencapai tak terhingga.

Kita harus membatasi tegangan lentur yang bertambah besar dan tegangan aksial kolom gabungan hingga batas elastis tegangan aksial (tegangan hancur), f_{MAKS}, dan kita menerapkan konsep tegangan gabungan

$$f_{MAKS} = \frac{F}{A} + \frac{M}{S} = \frac{F}{A} + \frac{M_0}{S(1 - F/F_{CR})}$$

yang dapat disusun dalam bentuk berikut ini:

$$f_{MAKS} = f + \frac{f \times \frac{1}{2}eh/r^2}{1 - \left(f \div 10E/(L/r)^2\right)}$$

Suku yang tak memiliki satuan, $\frac{1}{2}eh/r^2$, disebut rasio eksentrisitas, dengan h adalah kedalaman penampang melintang kolom dalam arah eksentrisitas beban e. Sebagian besar kolom—bahkan yang dianggap dibebani secara sentris—akan memiliki rasio eksentrisitas paling tidak sebesar 0,3 karena eksentrisitas yang tak disengaja akibat ketidaklurusan anggota struktur dan/atau pembebanan yang tak terletak persis di tengah. Rasio eksentrisitas yang lebih besar daripada 1 akan menghasilkan beberapa tegangan aksial tarik pada penampang melintang bagian struktur.

Manipulasi lebih lanjut dari rumus tersebut menghasilkan sebuah persamaan yang dapat kita gunakan untuk membuat plot dari hubungan antara kerampingan kolom yang dibebani secara eksentris, dengan tegangan maksimum yang dapat ditumpu oleh kolom tersebut tanpa mengalami tekuk:

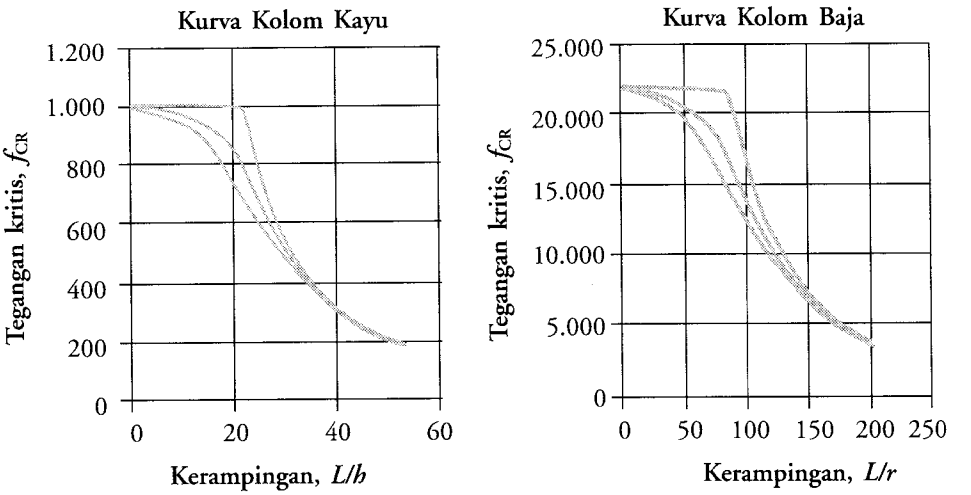
$$Lr = \sqrt{10E/f_{CR} - \frac{10E \times \frac{1}{2}eh/r^2}{f_{MAKS} - f_{CR}}}$$

Dengan sebuah batas elastis aksial bahan yang khusus, f_{MAKS}, modulus elastisitas E, dan rasio eksentrisitas $\frac{1}{2}eh/r^2$, kita mendapatkan titik-titik

untuk memplot hubungan antara tegangan tekan maksimum, f_{CR}, yang dimungkinkan pada sebuah kolom yang dibebani secara eksentris dengan rasio-rasio kerampingan L/r yang berbeda. Kita hanya perlu mensubstitusikan nilai-nilai f_{CR} dan menyelesaikan L/r hingga kita mendapatkan titik-titik yang cukup banyak untuk memplot suatu kurva. Untuk grafik yang dimulai dari nilai yang diinginkan untuk f_{MAKS} dengan $L/r = 0$, kita harus menambah f_{MAKS} dengan (1 + rasio eksentrisitas) ke dalam rumus. Perhatikan bahwa hubungan tersebut dikurangi untuk kasus kolom lurus dengan $e = 0$.

Rumpun-rumpun dari kurva anggota struktur tekan untuk rasio-rasio eksentrisitas yang berbeda dapat diplot untuk sebuah bahan tertentu. Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7.7, kurva-kurva diplot masing-masing untuk baja dan kayu. Karena bagian struktur beton yang diberi penulangan merupakan bagian struktur komposit, maka bagian struktur tersebut akan diselesaikan dengan cara yang berbeda, seperti yang akan kita lihat nanti ketika kita meninjau penerapan-penerapan desain beton.

Kami memodelkan kolom yang secara teoretis dengan mensubstitusikan nilai yang sangat kecil untuk rasio eksentrisitas ($\frac{1}{2}eh/r^2$ = 0,0001) ke dalam rumus dan membuat bagian atas dari ketiga kurva di tiap-tiap grafik. Kurva ini dengan tepat memperlihatkan bahwa tegangan kritis secara teoretis untuk kolom lurus yang pendek adalah tegangan tekan maksimum bahan, sedangkan tegangan tekan maksimum secara teoretis dari bagian-bagian struktur tekan yang ramping ditentukan oleh tegangan tekuk kritis $f_{CR} = 10E/(L/r)^2$. Kurva di mana garis horizontal berubah merupakan plot dari tegangan tekuk kritis ini, dan seringkali



GAMBAR 7.7

disebut kurva tekuk Euler (dengan faktor keamanan diterapkan pada kasus ini).

Kurva penuh yang berada di bawah pada tiap-tiap grafik diperuntukkan bagi nilai $\frac{1}{2}eh/r^2 = 0{,}3$, yang menghasilkan sebuah kurva yang secara akurat memperagakan data dari kolom aktual yang biasanya memiliki beban yang tak terletak persis di tengah dan juga kolom aktual yang memiliki ketidaklurusan awal. Kurva ini merupakan kurva yang akan kita gunakan untuk menganalisis dan/atau mendesain semua kolom.

Kurva tengah dari grafik-grafik tersebut mewakili nilai $\frac{1}{2}eh/r^2 = 0{,}1$, yang menunjukkan perbedaan antara elemen struktur tekan murni, dan kolom aktual. Kurva ini disertakan untuk membantu mengilustrasikan berbagai grafik yang dihasilkan dari berbagai rasio eksentrisitas, namun juga, seperti yang akan kita lihat, sebuah rasio eksentrisitas sebesar 0,1 dapat secara konservatif ditinjau untuk analisis atas flens tekan balok yang tak terkekang. Flens tekan balok berperilaku seperti kolom horizontal yang cenderung mengalami tekuk lateral. Apabila flens balok akan memiliki ketidaklurusan yang kecil seperti halnya anggota struktur kolom, tegangan lenturan tekan umumnya uniform melintangi lebar dari flens tekan balok, sehingga pada dasarnya eksentrisitas gaya tekan yang tak disengaja tidak eksis.

Kurva-kurva yang ditampilkan di sini didasarkan atas tegangan-tegangan bahan khusus yang diizinkan untuk kayu dan yang diizinkan untuk baja, masing-masing dengan faktor keamanan untuk memastikan agar batas tegangan tekan aksial elastis tidak berlebihan untuk kolom kekar yang memiliki rasio-rasio kerampingan yang kecil. Untuk kolom panjang, tekuk dicegah dengan menerapkan faktor keamanan sebesar antara 2 atau 3 pada modulus elastisitas E dari bahan. Untuk penampang melintang kolom yang berbentuk persegi panjang (yang merupakan penampang melintang tipikal untuk elemen struktur kayu), kita dengan tepat dapat menggantikan L/r dengan L/h, dengan h adalah kedalaman penampang melintang dalam arah eksentrisitas e, dan

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{bh^3}{12 \div bh}} = 0{,}29 \times h$$

Jadi, $L/h = 0{,}29 \times L/r$. Kita akan menggunakan ketiga kurva ini untuk menganalisis bagian-bagian struktur dan membuat graf desain kolom serta tabel desain kolom, yang berguna untuk berbagai macam penampang melintang baja dan kayu.

Untuk mendemonstrasikan rumus elemen struktur tekan yang dibebani secara eksentris, kita ingin menentukan apakah sebuah tabung baja berukuran 6 in. × 6 in. × $\frac{1}{2}$ in. cukup memadai untuk sebuah

kolom yang dibebani secara aksial. Sebuah beban aksial seberat 80.000 lb disalurkan ke kolom dengan tinggi 12 ft ini akibat reaksi balok yang dilas ke salah satu sisi bagian atas dari anggota struktur. Beban aksial memiliki eksentrisitas $e = \frac{6}{2} = 3$ in., dan radius girasi dari tabung adalah $r_y = \sqrt{I/A} = \sqrt{\frac{1}{12}\left(6^4 - 5^4\right)/\left(6^2 - 5^2\right)} = 2{,}5$ in., sehingga rasio eksentrisitas adalah $\frac{1}{2}eh/r^2 = \frac{1}{2}(3)(6)/(2{,}5)^2 = 1{,}44$. Karena kita tidak memiliki plot untuk rasio eksentrisitas ini, kita akan menggunakan rumus secara langsung untuk menyelesaikan tegangan tekan yang diizinkan.

Tegangan baja maksimum yang diizinkan yang telah disesuaikan adalah $f_{MAKS} = 22.000 \times (1 + 1{,}44) = 53.700$ psi dan $E = 30.000.000/2 = 15.000.000$ psi. Rasio kerampingan $L/r = (12 \times 12)/2{,}5 = 58$. Kita mensubstitusikan nilai ini ke dalam rumus kolom yang dibebani secara eksentris:

$$58 = \sqrt{\frac{10(15.000.000)}{f} - \frac{10(15.000.000) \times 1.44}{53.700 - f}}$$

Dengan menyamakan kedua sisinya, kita menyelesaikan tegangan kolom yang diizinkan $f = 16.000$ psi, sehingga beban yang diizinkan adalah $F_{IZIN} = 16.000 \times (6^2 - 5^2) = 176.000$ lb, sehingga kolom cukup memadai untuk menumpu beban eksentris.

7.7 GRAF-GRAF DESAIN KOLOM

Kita dapat menggunakan persamaan kolom yang dibebani secara eksentris untuk menghasilkan bagan-bagan desain yang berguna untuk penampang-penampang melintang kolom standar. Sebagai contoh, kita akan mengambil manfaat dari pembuatan sebuah rumpun graf yang menampilkan beban aksial yang diizinkan, F_{IZIN}, versus panjang kolom L untuk ukuran tiang kayu yang paling umum digunakan: 4 in. × 4 in., 6 in. × 6 in., 8 in. × 8 in., dan 10 in. × 10 in. Ukuran tersebut merupakan ukuran nominal, dan kita memotong bagian sebesar $\frac{1}{2}$ in. untuk menentukan ukuran aktualnya, seperti 5,5 in. × 5,5 in. untuk kolom berukuran nominal 6 in. × 6 in. Kolom kayu tidak diperbolehkan memiliki rasio eksentrisitas di atas 50. Jadi, sebuah kolom berukuran 4 in. × 4 in. hanya diperbolehkan memiliki rasio eksentrisitas $L/h = 50$, atau panjang kolom $L = 3{,}5\ (50)/12 = 14$ ft.

Bagan-bagan desain kolom biasanya ditampilkan oleh kolom-kolom yang diasumsikan dibebani secara memusat (sentris) dengan beberapa

ketetapan yang dibuat untuk eksentrisitas yang tak disengaja (ketidaklurusan dan/atau beban yang tak terletak persis di tengah), seperti mengasumsikan sebuah rasio eksentrisitas sebesar 0,3. Kita akan menggunakan tegangan tekan aksial yang diizinkan F_{MAKS} = 1.000 psi dan modulus elastisitas yang aman E = 580.000 psi. Kita ingin mengabaikan eksentrisitas dan menggunakan F_{MAKS} yang penuh dengan L = 0, sehingga tegangan maksimum yang diizinkan, yang digunakan dalam rumus ini harus menjadi f_{MAKS} × (1 + rasio eksentrisitas). Jadi, persamaan kolom yang dibebani secara eksentris untuk kayu dapat ditulis menjadi

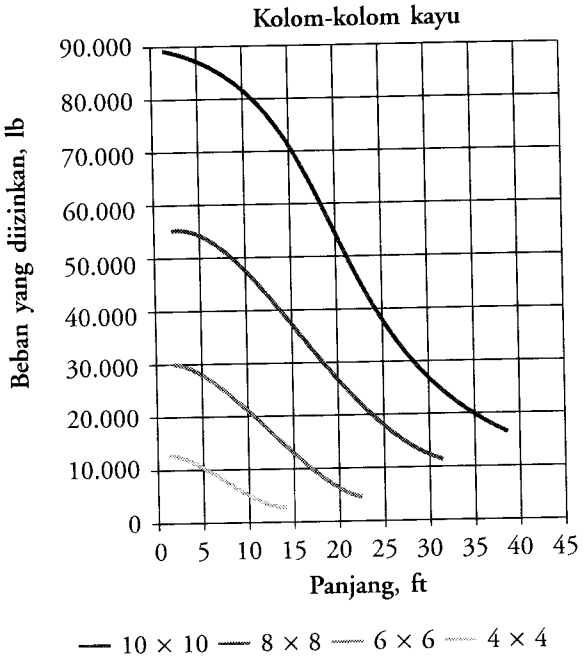
$$L/r = \sqrt{\frac{10(580.000)}{f} - \frac{10(580.000) \times 0{,}3}{1.300 - f}}$$

yang dapat disederhanakan menjadi

$$L = h^2 \times \sqrt{\frac{487.800}{F} - \frac{146.300}{1.300(h^2) - F}}$$

Sebuah lembar kerja (*spreadsheet*) dapat dibuat dengan kolom pertama pada gambar sama dengan kisaran beban-beban dari $F = 1.000 \times 9{,}5^2$ = 90.250 lb hingga F = 0 dengan menggunakan penambahan (*increments*) sebesar 250 lb. Ini akan menjadi sumbu Y dari bagan. Kemudian empat kolom yang bersebelahan dibuat, satu untuk tiap-tiap penampang

GAMBAR 7.8



melintang $h \times h$ dari kolom. Sel dari kolom-kolom ini menyimpan rumus kolom dengan nilai yang sesuai untuk penampang melintang h. Tiap-tiap baris dari empat kolom lembar kerja ini akan menghitung L yang terkait dengan nilai F pada baris yang sama. Data dapat diplot seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7.8. Ingatlah untuk mengubah L ke dalam ft, dan tidak memperlihatkan nilai apapun untuk $L/h > 50$. Sekarang kita dapat menggunakan bagan ini untuk menentukan ukuran-ukuran kolom kayu yang diperlukan dengan panjang kolom L, dan menentukan gaya tekan desain F.

Latihan Buatlah satu set kurva yang serupa untuk kolom-kolom kayu berukuran 12 in. × 12 in. dan 14 in. × 14 in. ■

7.8 Persamaan Interaksi Balok-Kolom

Ketika kita meninjau berbagai jenis elemen struktur pada sistem struktur, kita menemukan bahwa terdapat banyak bagian struktur yang menumpu gabungan dari tekan aksial dan momen lentur, sehingga istilah balok-kolom menjadi tepat untuk elemen-elemen struktur seperti itu. Apabila momen lentur diakibatkan hanya oleh eksentrisitas beban saja, maka kita dapat menganalisis bagian struktur dengan menggunakan persamaan kolom yang dibebani secara eksentris. Apabila bagian struktur memiliki beban tekan aksial dan beban transversal yang menghasilkan momen lentur, kita akan perlu menggunakan apa yang dikenal sebagai persamaan interaksi balok-kolom.

Mari kita mulai dengan persamaan tegangan gabungan (yang juga berfungsi sebagai titik awal untuk membuat kurva-kurva kolom):

$$f_{\text{MAKS}} = \frac{F}{A} + \frac{M_0}{S\left(1 - F/F_{\text{CR}}\right)}$$

Tegangan tekan aksial $f_C = F/A$. M_0 sebelumnya merupakan momen awal akibat eksentrisitas beban sehingga momen tersebut bergantung pada gaya aksial. Pada kasus ini, momen awal M_0 diperbesar, yang disebabkan oleh beban transversal yang tak bergantung pada gaya aksial. Tegangan lentur yang terkait dengan momen ini adalah $f_B = M_0/S$ dan kita dapat menulis

$$f_{\text{MAKS}} = fc + \frac{f_B}{(1 - fc/f_{CR})}$$

yang dapat disusun kembali menjadi

$$1{,}0 = \frac{f_C}{f_{MAKS}} + \frac{f_B}{f_{MAKS}(1 - f_C/f_{CR})}$$

Karena tegangan lentur dan tegangan aksial cukup bebas, kecuali untuk pembesaran momen pada kasus-kasus di mana f_C/f_{CR} memiliki nilai yang besar, tegangan maksimum yang diizinkan untuk tekan aksial dan untuk lentur, f_{MAKS}, tidak harus memiliki nilai yang sama. Kita dapat menyederhanakan rumus lebih lanjut dengan memperhatikan bahwa efek pembesaran momen biasanya akan sangat kecil untuk balok-kolom proporsional yang praktis, sehingga untuk kasus balok-kolom ini, kita dapat menyatakan bahwa $(1 - f_C/f_{CR}) = 1$. (*Catatan*: Apabila bagian struktur merupakan sebuah balok-kolom vertikal pada sebuah rangka penahan momen, pembesar momen tidak diabaikan, dan kita perlu meninjau efeknya, seperti yang nanti akan kita lihat.) jadi kita dapat menulis persamaan interaksi balok-kolom yang umum dalam istilah tegangan atau dalam istilah gaya dan momen, sebagai berikut:

$$\frac{F}{F_{IZIN}} + \frac{M}{M_{IZIN}} \leq 1{,}0$$

Hubungan interaksi ini menunjukkan pada kita bahwa kapasitas total dari sebuah balok-kolom dapat dirumuskan sebagai porsi yang tersedia untuk tekan aksial dan porsi yang tersedia untuk momen lentur. Selama penjumlahan dari porsi-porsi fraksional kurang dari atau sama dengan 1 kapasitas anggota struktur tidaklah dilebihi. Tegangan aksial yang diizinkan, F_{IZIN}, ditentukan dari kurva-kurva kolom, atau tabel-tabel desain, dan momen lentur yang diizinkan M_{IZIN}, adalah tegangan lentur yang diizinkan dikalikan dengan modulus penampang anggota struktur, $M = f_B \times S$. (Perhatikan bahwa tegangan lentur yang diizinkan berkurang untuk balok-balok panjang yang tak mengalami pengekangan, seperti halnya tegangan aksial tekan yang berkurang untuk kolom-kolom.) Kita nantinya akan memanfaatkan rumus ini ketika menganalisis bagian-bagian struktur kayu, baja, dan beton.

8 BESARAN-BESARAN TANAH YANG MENDASAR

8.1 TINJAUAN UMUM

Sekarang, kita alihkan perhatian kita dari analisis struktur yang berada di atas tanah, ke pembahasan mengenai keadaan tanah itu sendiri. Nantinya, kita akan kembali membahas gaya dan tegangan, ketika kita membahas jenis-jenis pondasi. Pada akhirnya, kita akan mengalihkan perhatian kembali pada struktur-struktur di atas tanah, ketika kita melihat cara kayu, baja, dan beton tersusun dalam lingkungan terbangun di sekitar kita.

Tarikan gravitasi dari bumi menyebabkan semua berat struktur di atas tanah ditumpu oleh tanah di atas permukaan bumi. Kesetimbangan gaya mensyaratkan agar semua beban vertikal dan beban horisontal yang bekerja pada sebuah struktur pada akhirnya harus disalurkan ke dalam bumi melalui beberapa jenis pondasi. Dengan demikian, studi mengenai struktur harus mencakup beberapa aspek yang mendasar mengenai analisis tanah dan perilaku tanah. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan oleh para pakar di bidang geologi, kita dapat mempelajari asal mula tanah. sedangkan dari bidang ilmu yang dikenal sebagai ilmu geoteknik, kita dapat mempelajari prosedur-prosedur standar eksplorasi tanah. pengambilan sampel tanah, dan mengklasifikasikan tanah serta menentukan kemampuan bahan tanah untuk menahan beban-beban struktur.

Untuk memahami hubungan-hubungan di antara ketiga bahan pembentuk tanah—padat, cair, dan gas, kita secara singkat akan meninjau situasi-situasi tipikal di mana kondisi lokasi konstruksi menuntut perubahan atas keadaan tanah yang ada. Kita meninjau mekanika dasar dari perilaku tanah apabila tanah mengalami pembebanan, dan kita juga akan meninjau cara berbagai macam pondasi yang berbeda menyalurkan beban-beban ini. Kita juga akan meninjau berbagai macam cara pemisahan tingkatan/muka tanah dapat dipertahankan melalui kemiringan atau struktur penahan tanah.

8.2 Formasi Tanah

Tanah dibentuk oleh bebatuan dan organisme-organisme hidup dalam jangka waktu yang sangat lama sebagai respons terhadap pengaruh gaya-gaya alami yang bekerja dari dalam kerak bumi dan pengaruh-pengaruh dari gaya-gaya atmosfer. Pada bagian tanah yang jauh dari permukaan, massa-massa tanah secara radikal mengalami perubahan akibat adanya gempa-gempa bumi yang menyebabkan retakan-retakan yang besar serta tanah longsor di permukaan bumi, dan gempa-gempa bumi tersebut juga menyebabkan letusan vulkanis yang membawa lava dan debu dari dalam inti bumi ke atas permukaan bumi serta membentuk lapisan tanah yang baru.

Di atas permukaan tanah, perubahan-perubahan cuaca menyebabkan perubahan pada bebatuan melalui cara-cara seperti retak pengembangan dan penyusutan, pembekuan air hujan dan pencairan air hujan dari celah-celah pegunungan, abrasi akibat angin dan air, reaksi-reaksi kimiawi, dan lain sebagainya. Formasi-formasi batuan yang masif terpecah menjadi tanah liat, batu, dan gravel yang kemudian akibat perubahan cuaca menjadi partikel-partikel yang lebih kecil seperti pasir, lanau, dan lempung, yang kita sebut tanah. Demikian juga, organisme-organisme hidup yang telah mati membusuk sebagai hasil dari perusakan organik dan membentuk partikel-partikel yang ringan serta lemah yang bercampur dengan bebatuan yang telah aus akibat perubahan cuaca; proses seperti ini sangat diinginkan karena dapat membentuk sebuah lapisan tanah atas yang subur untuk digunakan bertani.

Gaya-gaya alam yang sama yang bekerja untuk menghasilkan dan mengubah bebatuan menjadi partikel tanah yang kecil, juga bekerja untuk memindahkan partikel tanah tersebut dari satu tempat ke tempat yang lainnya. Tanah residual tetap berada pada lokasi asalnya, sedangkan tanah yang dipindahkan dibawa oleh angin, sungai-sungai, lautan, gletser, dan tanah longsor ke lokasi-lokasi yang baru sejauh ribuan mil. Jadi, pada lokasi manapun, biasanya terdapat berbagai jenis tanah dan berbagai ukuran lapisan tanah, masing-masing menunjukkan jenis-jenis lapisan tanah yang dipindahkan dari berbagai lokasi asal yang berbeda dan pada waktu yang berbeda pula.

Jadi, kemungkinan besar terdapat berbagai macam perbedaan jenis tanah yang drastis yang terdapat di sebuah lokasi proyek konstruksi tertentu. Sebagai contoh, ketika sebuah sungai yang meluap membawa sedimen-sedimen tanah yang mengalami erosi ke atas tepi-tepinya, kecepatan dari aliran luapan menurun, dan partikel pasir serta partikel gravel yang terbawa oleh luapan tersebut tertinggal dan membentuk tepian-tepian sungai yang berpasir. Di bawah tepian-tepian sungai, arus luapan

menjadi lebih lambat dan pada akhirnya berhenti, kemudian partikel tanah lempung dan partikel tanah lanau yang lebih kecil akan membentuk lapisan tanah endapan.

Komposisi kimiawi dari tanah identik dengan batuan api (*igneous*), batuan sedimenter (*sedimentary*), dan batuan metamorfik (*metamorphic*) yang setelah mengalami proses perubahan akibat cuaca membentuk lapisan tanah. Batuan-batuan api seperti batu granit dan batu basalt terbentuk dari proses pendinginan lava yang meleleh dari dalam bumi. Batuan sedimenter, seperti batu serpih, batu pasir, dan batu kapur membentuk lapisan tanah yang memindahkan dan menekan lapisan tanah yang lebih bawah dengan suatu tekanan, sehingga lapisan tanah yang tertekan tersebut kembali menjadi formasi batuan. Batuan-batuan metamorfik berasal dari batuan api atau batuan sedimenter, tetapi setelah mengalami tekanan yang ekstrim, dan/atau mengalami panas yang ekstrim dari lapisan-lapisan tanah yang berulangkali mengalami pembebanan (*overburden*), batuan-batuan tersebut bisa berubah menjadi batu tulis, batu pasir kuarsa, atau marmer.

Bahan-bahan bangunan struktur yang telah kita bahas—kayu dari hasil penebangan pohon-pohon, komponen-komponen beton dari semen lanau yang dihancurkan dan dibakar serta agregat kasar dan agregat halus, serta baja yang terbuat dari biji besi dan logam-logam campuran lainnya—dalam batas tertentu sebenarnya bisa saja merupakan bentuk perubahan tanah lebih lanjut yang dilakukan oleh manusia. Dengan berjalannya waktu, bahan-bahan struktur yang saat ini digunakan akan rusak dan suatu saat akan kembali lagi ke bumi, begitu pula proses konstruksi yang terlihat cukup menyeluruh dengan sebuah dunia yang terus mengalami perubahan secara alami.

8.3 Eksplorasi Tanah dan Pengambilan Sampel Tanah

Kita telah melihat pembahasan singkat mengenai sejarah tanah bahwa lokasi asal tanah, proses terbentuknya tanah, serta sifat-sifat mekanik tanah secara radikal berbeda dari satu lokasi dengan lokasi lainnya. Sebelum kita mulai membangun sebuah struktur di sebuah lokasi, seorang ahli geoteknik yang terbiasa dengan sejarah geologis umum dari daerah tersebut harus mengeksplorasi kondisi-kondisi subpermukaan tanah dari lokasi konstruksi. Insinyur geoteknik tersebut akan menggunakan penilaian-penilaian teknis kelayakan yang dilandasi oleh petunjuk yang dihasilkan dari pengujian-pengujian standar terhadap tanah, untuk mengklasifikasikan tanah dan menyelidiki ciri-ciri perilaku memikul-beban tanah yang mungkin terjadi apabila tanah tersebut mengalami pembebanan. Berdasarkan analisis geoteknis dari lokasi tersebut dan pengetahuan

mengenai jenis struktur yang akan dibangun serta ukuran struktur yang direncanakan, ahli geoteknik tersebut dapat membuat rekomendasi mengenai jenis pondasi yang paling tepat.

Eksplorasi subpermukaan tanah biasanya melibatkan proses pengeboran di beberapa tempat di sekeliling lokasi konstruksi. Sebuah lubang pengeboran dapat dibuat dengan menggunakan sebuah bor dengan ulir seperti baut yang secara periodik diangkat keluar dari lubang untuk membersihkan mata bor dari tanah, atau dengan sebuah pemotong (*cutting bit*) yang digabungkan dengan air bertekanan yang secara terus menerus membersihkan tanah ke atas permukaan melalui sebuah wadah pelat baja yang masuk ke dalam lubang. Spesimen-spesimen sampel dari tanah yang dilubangi dipindahkan, sedangkan pengeboran lubang dilakukan kira-kira setiap 5 ft, atau setiap stratum tanah yang berbeda ditemukan. Apabila stratum batuan yang tak diketahui ketebalannya ditemukan, sebuah peralatan pengebor inti batuan digunakan untuk menembus lapisan batuan tersebut dan sampel-sampel batuan diambil untuk menentukan kekuatan lapisan batuan tersebut.

Untuk tiap-tiap proses pengeboran tanah, data dikumpulkan secara cermat sehingga sebuah catatan yang disebut catatan pengeboran (*boring log*) nantinya dapat disusun di laboratorium pengujian tanah. Ketika proses pengeboran dilaksanakan pada sebuah lokasi tertentu, tiap-tiap spesimen sampel tanah yang diambil secara khusus diberi label dan kedalaman pengambilan sampel tersebut dicatat, dan semua hasil pengujian dan pengamatan umum didokumentasikan untuk analisis lebih lanjut.

Peralatan pengeboran dapat dipindahkan dan diganti dengan peralatan khusus untuk pengujian/pengambilan sampel, tergantung dari apa yang telah diamati atas tanah yang dikeluarkan dari lubang pengeboran. Sebuah peralatan khusus yang dikenal sebagai tabung Shelby adalah tabung baja tahan-karat berdinding tipis yang berongga dengan panjang sekitar 2 ft dan berdiameter sekitar 3 in., yang diturunkan ke bawah lubang pengeboran dan panjang penuh tabung tersebut menekan tanah yang tidak terkena proses pengeboran. Setelah dikeluarkan dari lubang, isi dari tabung dapat ditinjau sebagai sebuah sampel tanah yang tak terkena proses pengeboran yang layak diuji di laboratorium tanah untuk memberikan sebuah indikasi yang layak mengenai sifat-sifat tanah di lokasi konstruksi yang mengandung campuran tanah yang tersusun dari tanah lempung, lanau, dan/atau pasir.

Apabila proses pengeboran tanah telah mencapai lapisan tanah yang berpasir, tabung Shelby tidak akan dapat bekerja secara baik, karena partikel-partikel tanah granular akan cenderung jatuh ke bawah ketika tabung Shelby tersebut diangkat ke atas. Sebagai gantinya, sebuah peralatan khusus berbentuk sendok-pembagi (*split spoon*) digunakan.

Peralatan ini serupa dengan tabung Shelby, tetapi bentuknya lebih kecil dan peralatan tersebut membagi tanah secara longitudinal menjadi dua bagian untuk mendapatkan sampel yang terkena pengeboran. Peralatan ini secara luas juga digunakan sebagai peralatan standar untuk melakukan prosedur yang dikenal dengan nama Pengujian Penetrasi Standar (*Standard Penetration Test*/SPT). Dalam prosedur tersebut, banyaknya pukulan yang dilakukan melalui sebuah pemberat khusus yang dijatuhkan dari ketinggian khusus yang dibutuhkan untuk menggerakkan sendok-pembagi sejauh 12 in. ke dalam tanah disebut hitungan pukulan pengujian penetrasi standar, N, (pukulan per ft). Selama ini, data empiris yang telah dikumpulkan secara akurat menghubungkan N dengan kepadatan tanah dan kekuatan tanah, terutama untuk tanah berpasir.

8.4 Klasifikasi Tanah

Data lapangan yang dikumpulkan pada tiap-tiap lokasi pengeboran tanah di lokasi konstruksi, bersama-sama dengan sampel-sampel tanah yang telah diberi label, dibawa ke laboratorium pengujian tanah di mana uji-uji standardisasi lebih lanjut dilakukan atas sampel-sampel tanah tersebut. Uji-uji tersebut memungkinkan berbagai macam lapisan tanah yang ditemukan untuk diklasifikasikan, dan laporan catatan pengeboran digunakan serta dianalisis sebagai bagian dari laporan geoteknis (tanah) akhir. Kemungkinan terdapat beberapa pengujian tanah lainnya yang dilakukan untuk menentukan kekuatan tanah, kompresibilitas tanah, kepadatan optimum tanah, dan lain sebagainya, tergantung pada struktur yang sedang ditinjau. Hasil dari seluruh penelitian di laboratorium disertakan dalam laporan tanah bersama-sama dengan rekomendasi-rekomendasi spesifik menyangkut jenis pondasi yang paling sesuai untuk menyalurkan beban struktur menuju ke dalam tanah di lokasi konstruksi.

Sebuah sampel tanah biasanya merupakan campuran dari beberapa atau keempat jenis partikel tanah yang utama—gravel, pasir, lanau, dan lempung, dan memperlihatkan karakteristik-karakteristik dari campuran tanah yang bervariasi sesuai dengan kandungan fraksional dari tiap-tiap jenis partikel. Salah satu dari prosedur klasifikasi standar utama untuk menentukan karakteristik sebuah campuran tanah adalah analisis saringan, yang dilakukan untuk menentukan ukuran dan proporsi dari partikel-partikel dalam campuran, khususnya untuk menentukan berapa porsi butiran agregat kasar dan berapa porsi butiran agregat halus. Partikel-partikel seperti gravel dan pasir yang tidak dapat melewati saringan no. 200, yang hanya memiliki lubang persegi sebesar 0,003 in., diberi istilah

butiran kasar, dan proporsi butiran serta ukuran butiran kasar sangat menentukan perilaku dari campuran tanah.

Partikel-partikel tanah yang melewati lubang kecil dari saringan no. 200—tanah lanau dan tanah lempung—diberi istilah butiran halus, atau agregat halus. Apabila campuran tanah mengandung agregat halus, maka pengaruh agregat halus tersebut terhadap karakter tanah diukur dengan menggunakan pengujian-pengujian standar yang dikenal dengan nama pengujian *batas plastis* dan pengujian *batas cair*. Batas plastis adalah kandungan kelembapan di mana sebuah sampel pertama-tama akan hancur ketika digulung dalam ikatan-ikatan berdiameter $\frac{1}{8}$ in., sedangkan batas cair yang lebih tinggi adalah kandungan kelembapan di mana viskositas dari tanah menjadi cair. Perbedaan dari kedua batas ini menghasilkan indeks plastisitas tanah, yang menentukan sifat dari agregat-agregat halus yang ada di campuran tanah tersebut. Indeks plastisitas memberikan indikasi mengenai cara campuran tanah berperilaku dalam berbagai kondisi kelembapan, dan seberapa besar karakter tanah terpengaruh oleh gaya-gaya yang saling menarik yang sama dari partikel-partikel agregat halus.

Partikel tanah lempung sangatlah kecil, diameternya sekitar 0,0002 in. atau lebih kecil, yang menyatu bersama-sama sebagai hasil dari gaya-gaya magnetis saling menarik yang sama—ini diistilahkan sebagai *kohesi*. Ukuran partikel gravel, ukuran partikel pasir, dan ukuran partikel tanah lanau secara berurutan ditentukan berada dalam kisaran dari 0,1 in. hingga 1 in., 0,004 in. hingga 0,1 in., dan 0,0002 in. hingga 0,004 in. Partikel-partikel tersebut tidak memiliki kohesi, dan mereka saling melekat dengan mekanisme saling-mengunci melalui friksi atau gesekan di antara permukaan partikel yang kasar. Materi-materi organik bisa saja eksis dalam campuran tanah, dan apabila terdapat jumlah yang cukup banyak dari materi yang ringan dan lemah ini, maka materi organik tersebut dapat menimbulkan dampak yang merugikan pada kekuatan tanah.

Apabila suatu tanah secara dominan tersusun dari kerikil dan pasir, maka tanah tersebut disebut tanah granular, dan akan diidentifikasi dengan label-label seperti gravel bergradasi-baik, pasir bergradasi-buruk, gravel lanau, dan pasir lempung. Tanah seperti ini memiliki kekuatan dukung yang sangat baik dengan penurunan (*settlement*) yang sedikit, dan karena tanah tersebut cukup kering, maka tanah itu bisa digunakan sebagai urukan untuk dinding-dinding penahan . Tanah dengan campuran seperti ini umumnya tidak memiliki kohesi, dan kekuatan tanah jenis ini ditentukan oleh friksi atau gesekan interpartikel internalnya. Hasil-hasil pengujian penetrasi standar menghasilkan *sudut gerak bahan*, atau *sudut diam*, ϕ. Sudut ini dapat digambarkan sebagai kemiringan dari sisi-sisi bahan apabila bahan tersebut terbentuk menjadi sebuah gundukan. Kita telah membahas sudut friksi ini dalam buku ini sebelumnya, di mana

kita menamakan sudut ini sebagai sudut z. (Anda akan melihat bahwa di sini digunakan berbagai macam peristilahan yang berbeda untuk menjelaskan berbagai hal mengenai tanah dan pondasi.)

Apabila butiran-butiran halus dari tanah lempung dan/atau tanah lanau mendominasi sebuah campuran tanah, hasilnya merupakan sebuah tanah kohesif yang bersifat plastis dan melekat serta dapat diklasifikasikan sebagai tanah lempung-kurus (*lean clay*), tanah lanau-lempung (*clayey silt*), dan tanah lempung organik. Tanah-tanah ini cenderung memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan tanah-tanah granular dan dapat mengalami penurunan yang berarti apabila tanah tersebut menumpu beban. Tanah-tanah yang sangat kohesif seringkali sangat plastis, memiliki kecenderungan menyusut dan mengeras akibat perubahan-perubahan kelembapan serta mengalami deformasi secara terus menerus akibat pembebanan, dan hal ini dapat menyebabkan masalah-masalah pondasi yang serius untuk tanah lempung yang lepas dan mengalami kejenuhan. Tanah dengan butiran-butiran halus tidak dapat mengeringkan air dengan baik, sehingga tanah jenis ini tidak dapat digunakan sebagai bahan urukan, namun tanah ini berguna sebagai inti bendungan-bendungan dan tanggul-tanggul yang terbuat dari tanah liat. Tanah-tanah kohesif yang cenderung mengalami kejenuhan apabila terkena air, akan menahan beban-beban struktur melalui kohesi interpartikel, c, dan seiring berlalunya waktu, sebagian dari kandungan air akan disalurkan, akibat tekanan, ke tanah-tanah di sisi-sisinya dan sebagian dari beban kemudian akan ditahan oleh friksi atau gesekan intergranular, seperti yang telah kita bahas untuk partikel-partikel pasir.

Apabila partikel-partikel butiran-halus terutama tanah lempung, ada dalam jumlah yang memadai, dan mendominasi campuran tanah, campuran tanah tersebut disebut tanah kohesif, atau seringkali disebut tanah lempung. Apabila hanya sedikit kandungan tanah lempung atau tidak ada kandungan tanah lempung dan campuran tanah tersebut didominasi oleh pasir butiran-kasar, maka campuran tanah itu disebut sebagai tanah tanpa kohesi, atau pasir. Kedua klasifikasi tanah ini menjadi pusat perhatian kita ketika kita menganalisis perilaku dari tanah untuk tujuan-tujuan struktur.

8.5 Hubungan Volume-Kepadatan

Selain pengujian-pengujian yang dilakukan untuk tujuan mengklasifikasikan tanah dan untuk menentukan kekuatan tanah tersebut, terdapat berbagai macam pengujian tanah yang terstandardisasi lainnya untuk menentukan sifat-sifat tanah seperti kepadatan tanah, kandungan

kelembapan tanah, rasio rongga tanah, permeabilitas tanah, kepadatan kering optimum tanah, dan kompresibilitas tanah. Hal yang mendasari pengujian-pengujian ini melibatkan tinjauan dari sampel tanah sebagai komposit dari tiga komponen utama: partikel-partikel solid yang kecil dari batuan yang telah mengalami proses perubahan cuaca (dan mungkin materi organik yang telah membusuk), air, dan udara.

Ketika membangun struktur di atas tanah, kita seringkali perlu membawa tanah tambahan (yang disebut tanah galian) dari lokasi lain (seringkali disebut sumber tanah timbunan). Tanah tambahan tersebut harus diperkuat dengan proses pemadatan, atau penekanan partikel-partikel tanah menjadi lebih dekat antara satu dengan yang lainnya. Untuk mengestimasi kuantitas-kuantitas tanah dan mengukur besarnya pemadatan yang diperlukan, kita perlu meninjau beberapa hubungan yang mendasar antara volume dari ketiga komponen tanah dengan kepadatan dari ketiga komponen tanah tersebut, yaitu partikel solid, air, dan udara.

Pada Gambar 8.1, sebuah volume tanah sebesar 1 ft^3 diperlihatkan dengan ketiga komponennya berada dalam keadaan natural, di mana partikel batuan padat dipisahkan oleh ruang-ruang rongga yang terisi dengan udara dan mungkin juga terisi dengan air. Untuk tujuan analisis, kita memikirkan sebuah ide dari seorang ahli teknik mengenai 1 ft^3 dari tanah dengan volume, $V = 1$ ft^3. Kita melihat bahwa volume terdiri dari volume bagian yang solid dari tanah yang diberi label V_S, dan kita pisahkan volume dari ruang rongga V_V, ke volume yang terisi oleh air, V_W, dan volume dari udara yang ada V_A, dan

$$V = V_S + V_V = V_S + V_W + V_A = 1$$

Rasio dari volume rongga tanah terhadap volume tanah yang padat ditentukan sebagai rasio rongga, e, sehingga

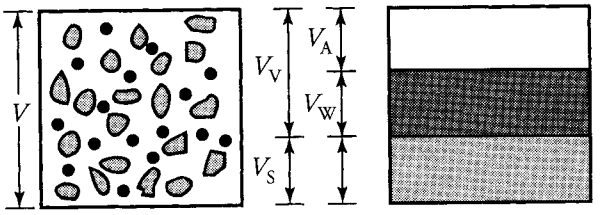
$$e = \frac{V_V}{V_S}$$

Nilai-nilai tipikal dari e berkisar dari 0,5 hingga 0,9 untuk pasir-pasir padat, dan berkisar dari 0,7 hingga sebesar 3 untuk tanah lempung yang lepas (*loose clay*). Struktur-struktur yang dibangun di atas tanah dengan rasio-rasio rongga yang relatif besar akan mengalami penurunan yang lebih besar daripada apabila tanah yang bersangkutan lebih padat, dengan nilai e terkait yang lebih kecil.

Berat total W dari volume ft^3 tanah sama dengan berat dari kandungan tanah yang solid, W_S, ditambah berat kandungan air, W_W, dengan berat kandungan udara diabaikan, sehingga kita mendapatkan

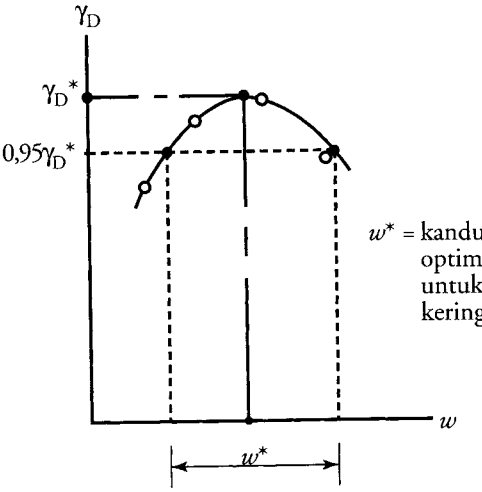
$$W = W_S + W_W$$

GAMBAR 8.1



$$V = V_V + V_S$$
$$V_V = V_A + V_W$$
$$V = V_A + V_W + V_S$$
$$W = W_W + W_S$$

$$e = V_V/V_S \qquad \gamma = W/V \qquad \gamma_D = W_S/V \qquad w = W_W/W_S \times 100\%$$
$$\gamma_D = \gamma/(1 + w)$$



w^* = kandungan kelembapan optimum yang dibutuhkan untuk mencapai kepadatan kering optimum = γ_D^*

Kisaran kelembapan untuk mencapai pemadatan optimum sebesar 95%

Kita dapat dengan mudah menggunakan timbangan untuk mengetahui berat sampel dan menentukan W, kemudian mengeluarkan kandungan air dari sampel dengan pengeringan-oven dan menimbangnya lagi untuk menentukan berat dari kandungan tanah yang solid, W_S. Kepadatan, γ. ditentukan sebagai berat per volume satuan

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

Berat dari sampel sebesar 1 ft^3 ini memberikan kita kepadatan tanah $\gamma = W/V = W$, dan kepadatan kering dari tanah yang ditentukan sebagai

$$\gamma_D = \frac{W_S}{V}$$

Untuk sebuah volume satuan, $\gamma_D = W_S$.

Berat kandungan air dari sampel adalah perbedaan antara kedua berat yang telah ditimbang, $W_W = W - W_S$. Kita menentukan kandungan air (atau kandungan kelembaban), w, sebagai rasio dari berat kandungan air terhadap berat dari kandungan tanah yang solid yang dirumuskan sebagai persentase sebesar

$$w = \frac{W_W}{W_S} \times 100\%$$

Kandungan kelembapan sangatlah bervariasi. Biasanya kandungan berkisar hingga 30%, bahkan dapat mencapai lebih dari 100% untuk deposit-deposit tanah lempung yang lepas.

Anggaplah kepadatan tanah, kandungan kelembapan tanah, dan rasio rongga tanah dari sebuah sumber tanah timbunan di lokasi secara berurutan adalah $\gamma = 110$ pcf, $w = 15\%$, dan $e = 0{,}9$, serta bahan tanah galian yang lepas sebesar 100.000 ft^3 diperlukan di sebuah lokasi konstruksi. Ketika menggali tanah dan memindahkan tanah, udara tambahan ditambahkan ke tanah yang digali sehingga tanah menjadi lebih lepas karena volumenya mengalami ekspansi, atau mengembang. mungkin sebesar 20%. Faktor ini kadang-kadang disebut faktor ringan (*fluff factor*). Berapakah volume bahan tanah timbunan yang diambil (artinya, berapakah ukuran lubang yang dihasilkan), dan berapakah kepadatan tanah, berapakah kandungan kelembapan tanah, serta berapakah rasio rongga tanah yang lepas yang diletakkan di truk-truk pengangkut apabila faktor pengembangannya (*swell factor*) adalah 15%?

Karena volume tanah galian 15% lebih besar daripada volume di lokasi, maka rasio volume tanah galian terhadap volume-volume sumber tanah timbunan di lokasi adalah $V_f/V_i = 1{,}15$. Dengan demikian, lubang akan memiliki volume sebesar

$$V_i = \frac{V_f}{1{,}15} = \frac{100.000}{1{,}15} = 87.000 \text{ ft}^3$$

Sesuai dengan yang telah ditentukan, $V = V_S + V_V = V_S + V_W + V_A$, dan hanya suku yang terakhir, V_A, yang mengalami perubahan.

Dengan melihat sebuah sampel tanah di lokasi dengan volume satuan $V_i = 1$ ft^3, dan dengan berat satuan $\gamma_i = W/V_i = 110$ pcf, apabila sampel yang sama ini mendapatkan rongga-rongga udara yang lebih banyak dan mengalami pemuaian dengan volume $V_f = 1{,}15V_i$, berat total sampel $W = W_S + W_W$ tidak mengalami perubahan. Namun demikian, kita menemukan bahwa berat satuan dari tanah galian yang lepas harus berkurang menjadi kepadatan tanah sebesar

$$\gamma_f = \frac{W}{V_f} = \frac{110}{1{,}15} = 95{,}6 \text{ ft}^3$$

Seperti yang baru saja kita lihat, volume tanah dan kepadatan tanah berubah dari keadaan tanah di lokasi menjadi keadaan tanah yang lepas, bukan merupakan penjumlahan kedua komponen berat, $W_S + W_W$, dan juga bukan proporsi-proporsi relatif dari W_S dan W_W. Kita ingat bahwa kandungan air ditentukan sebagai $w = W_W/W_S \times 100\%$, dan kita menyimpulkan bahwa kandungan air tidak berubah ketika tanah dipindahkan.

Ketika volume tanah di lokasi mengalami pengembangan, adalah volume dari rongga-rongga, V_{Vf} yang berubah, sedangkan volume dari kandungan tanah yang solid, $V_S = V_{Si} = V_{Sf}$, tetaplah sama. Sesuai dengan ketentuan mengenai rasio rongga, untuk tanah di lokasi, $V_{Vi} = 0{,}9V_S$. Untuk sebuah volume satuan $V_i = 1$ ft^3:

$$1 = V_S + V_{Vi} = V_S + 0{,}9V_S$$

Dari persamaan di atas, kita mendapatkan $V_S = 0{,}526$ ft^3, dan $V_{Vi} = 1 - 0{,}526 = 0{,}474$ ft^3. Untuk bahan tanah galian, di mana $V_f = 1{,}15$ ft^3

$$1{,}15 = 0{,}526 + V_{Vf}$$

Volume dari rongga-rongga adalah $V_{Vf} = 0{,}624$ ft^3, dan rasio rongga bertambah dari $e = 0{,}9$ menjadi

$$e = \frac{V_{Vf}}{V_S} = \frac{0{,}624}{0{,}526} = 1{,}19$$

8.6 Pemadatan Tanah

Bertambahnya volume udara pada tanah galian yang lepas menghasilkan tanah yang memiliki kompresibilitas yang lebih baik dan absorpsi air yang lebih baik daripada keadaan sebelumnya. Apabila sebuah struktur, jalan raya, atau tanggul akan dibangun di atas tanah seperti ini, maka tanah tersebut harus diperbaiki keadaannya dengan sebuah proses pemadatan tanah. Pemadatan tanah melibatkan proses pemadatan dengan peralatan yang sangat berat untuk memaksa partikel-partikel tanah mengalami kontak yang lebih dekat, sehingga rongga-rongga udara yang ada dapat tertekan ke luar. Hasilnya adalah sebuah tanah yang lebih padat, lebih kuat, lebih kaku, dan kurang porositasnya sehingga akan lebih baik digunakan sebagai dasar untuk slab yang diletakkan di atas muka tanah, pengkakian, alas jalan raya, atau tanggul.

Pemadatan tanah biasanya dilakukan pertama-tama dengan menyebarkan tanah galian sebanyak satu lapisan atau lebih, dengan tebal 8 in. hingga 12 in., yang disebut lapisan-lapisan ketinggian vertikal (*lifts*). Kemudian, pengukuran kepadatan tanah dan kandungan kelembapan tanah dilakukan untuk membuktikan kebenaran bahwa bahan tanah telah

dipersiapkan secara optimum, setelah melalui Pengujian Proctor (*Proctor Test*) yang akan kita bahas segera setelah pembahasan ini. Lalu, mesin-mesin penggiling yang besar, berat, dengan permukaan yang mulus atau dengan permukaan yang memiliki tonjolan digerakkan melintasi lapisan ketinggian vertikal tanah seperti halnya proses penghalusan sebuah kue donat oleh sebuah penggiling adonan. Setelah mesin-mesin penggiling menggiling lapisan tanah tersebut beberapa kali, sekarang lapisan tanah tersebut memiliki ketebalan sekitar 75% dari ketebalan tanah awal sebelum mengalami proses penggilingan. Sebuah lapisan subdasar dari sebuah jalan raya mungkin hanya memerlukan satu atau dua lapisan ketinggian tanah, sedangkan sebuah tanggul akan memerlukan banyak lapisan ketinggian vertikal tanah.

Proses pemadatan tanah ini hanyalah kebalikan dari proses penimbunan tanah seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, sehingga sebagai hasil dari sebuah proses pemadatan tanah, kepadatan tanah galian semakin bertambah, volume tanah dan rasio rongga tanah berkurang, dan tidak ada perubahan yang terjadi pada kandungan kelembapan tanah akibat prose penggilingan tersebut. Namun demikian, lapisan ketinggian vertikal tanah harus secara optimum dipersiapkan sebelum proses pemadatan tanah dilakukan dan kita harus memastikan kandungan kelembapan tanah tersebut berada dalam kisaran yang telah ditentukan oleh hasil-hasil pengujian di laboratorium pengujian tanah.

Terdapat satu nilai tunggal dari kandungan kelembapan tanah yang akan mencapai sebuah tingkat kepadatan tanah optimum yang dimungkinkan dari bahan tanah galian, apabila tanah tersebut telah mengalami proses penggilingan sebanyak beberapa kali lintasan oleh sebuah mesin penggiling dengan berat tertentu. Apabila kandungan kelembapan pada tanah tersebut terlalu kecil, friksi akan mencegah partikel tanah yang kurang terlekat mengalami kontak secara bebas dan memadai untuk menghilangkan sebanyak mungkin rongga udara yang mungkin ada. Sebaliknya, kandungan kelembapan atau air yang terlalu banyak pada tanah juga akan menyebabkan partikel-partikel tanah tidak dapat mengalami kontak yang dekat karena cairan yang berlebihan telah memenuhi ruang-ruang rongga udara yang masih ada.

Sebuah prosedur pengujian standar yang dikenal dengan nama Pengujian Standar Proctor (*Standard Proctor Test*) dilakukan di sebuah laboratorium pengujian tanah dengan menggunakan sampel dari bahan tanah galian. Dalam prosedur ini, empat atau lima subsampel diambil dari sampel tanah galian, dan kandungan kelembapan tanah dari tiap-tiap subsampel dibedakan dengan menambahkan atau menghilangkan sebagian kandungan kelembapan tanah dari spesimen-spesimen tersebut. Selanjutnya, untuk tiap-tiap subsampel, beberapa lapisan setebal 1 in. dipadatkan di dalam sebuah silinder baja kecil dengan volume spesifik

yang menggunakan berat tertentu yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu. Tiap-tiap subsampel yang telah dipadatkan lalu dikeluarkan dari silinder baja, ditimbang beratnya, diberi pengeringan-oven dan ditimbang kembali untuk menentukan kepadatan setelah pengeringan-oven, γ_D, dan untuk menentukan kandungan kelembapan tanah, w (selisih dari kedua berat dibagi dengan berat kering tanah). Sebuah plot yang serupa dengan yang diperlihatkan pada gambar dihasilkan oleh empat atau lima titik-titik data.

Puncak dari kurva menunjukkan kepadatan kering tanah optimum, γ_D^*, dan kandungan kelembapan tanah optimum yang terkait, w^*. Kepadatan tanah optimum menunjukkan keadaan terpadat dari tanah yang dicapai apabila proses pemadatan tanah menggunakan prosedur-prosedur rutin lapangan. Merupakan suatu hal yang hampir mustahil dilakukan untuk menambahkan atau menghilangkan kelembapan dari bahan tanah galian untuk mendapatkan kandungan kelembapan optimum yang eksak, yang memungkinkan kita mendapatkan kepadatan tanah terbesar yang dimungkinkan setelah mengalami proses pemadatan tanah. Jadi, kita menggunakan kepadatan kering tanah versus plot kelembapan tanah untuk menentukan kisaran dari nilai-nilai kandungan kelembapan tanah, di mana dari nilai-nilai tersebut kita bisa mendapatkan suatu kepadatan kering tanah yang dapat diterima yang berada dalam 95% dari nilai kepadatan kering tanah optimum.

Apabila kita meninjau volume dari tanah galian yang dipadatkan dengan pengeringan-oven, kepadatan kering dari tanah galian tersebut adalah berat dari kandungan tanah yang solid dalam volume ft^3, $\gamma_D = W_S/V$, sehingga $\gamma_D/W_S = 1$. Sebuah volume satuan dari tanah galian yang telah dipadatkan di lapangan akan memiliki baik kandungan tanah yang solid maupun kandungan air, dan sesuai dengan yang telah ditentukan sebelumnya, volume satuan dari tanah ini memiliki kepadatan $\gamma = (W_S + W_W)/V$, sehingga $\gamma/(W_S + W_W) = 1$. Dengan menyamakan rasio kepadatan kering tanah dan rasio kepadatan basah tanah yang masing-masing sama dengan 1, dan memperhatikan bahwa $w = W_W/W_S$ (dalam bentuk fraksional), kita mendapatkan suatu rumus berguna

$$\gamma_D = \frac{\gamma}{1 + w}$$

Kita dapat menggunakan rumus ini untuk memastikan bahwa tanah galian telah dipadatkan dan kepadatan tanah kering yang telah dihitung, γ_D, berada dalam 95% dari kepadatan kering tanah optimum, γ_D^*, yang ditentukan dari hasil Pengujian Proctor. Sebuah peralatan pengukur kandungan kelembapan/kepadatan tanah telah tersedia untuk mengukur

γ dan w di lapangan. Beberapa pembacaan mengenai kepadatan kelembapan tanah telah dilakukan, dan apabila kepadatan kering tanah yang dihitung tidak berada dalam 95% dari nilai optimum, maka diperlukan suatu proses pemadatan tanah lebih lanjut.

Pengujian Proctor yang dimodifikasi (*Modified Proctor Test*) merupakan sebuah prosedur pengujian yang serupa dengan Pengujian Proctor, dengan pengecualian di mana Pengujian Proctor yang dimodifikasi menggunakan sebuah proses pemadatan tanah lebih lanjut dengan menggunakan peralatan yang lebih berat. Pengujian ini biasanya diperlukan ketika peralatan-peralatan konstruksi yang lebih berat dilakukan untuk pembangunan, katakanlah landasan-landasan terbang bandar udara versus jalan bebas hambatan dua-jalur di luar kota. Karena diperlukan pemadatan tanah lebih lanjut, Pengujian Proctor yang Dimodifikasi biasanya akan menghasilkan sebuah spesifikasi dari kepadatan kering tanah yang lebih tinggi dan kisaran kelembapan tanah yang diizinkan, yang lebih sulit untuk dicapai.

8.7 Pemadatan Tanah untuk Lahan Pemukiman

Apabila sebuah lapisan jalan raya, slab bangunan, atau tanggul akan dibangun langsung di atas ketinggian tanah yang ada, maka tanah tersebut dan/atau tanah galiannya harus dipadatkan agar dapat berfungsi sebagai pondasi yang memperkuat struktur yang akan dibangun. Sebelumnya telah dijelaskan cara tanah dipadatkan, pertama-tama dengan Pengujian Proctor Standar untuk menentukan kepadatan kering tanah optimum dan kisaran dari kandungan kelembapan tanah di mana tanah dapat dipadatkan hingga berada dalam 95% dari kepadatan tanah optimum. Bergantung pada spesifikasi-spesifikasi dari pekerjaan strukturnya, tanah dipadatkan dalam lapisan-lapisan ketinggian vertikal setebal 8 in. hingga 18 in., dan kepadatan tanah yang telah dipadatkan dari tiap-tiap lapisan dapat diuji di lapangan dan/atau sebuah peralatan khusus untuk mengukur kelembapan-kepadatan tanah dapat digunakan untuk menentukan apakah proses pekerjaan pemadatan tanah yang tepat telah tercapai.

Anggaplah sebuah rumah akan dibangun dengan rantai di atas pondasi muka tanah, dan sebagian besar dari muka tanah tempat struktur akan dibangun perlu ditinggikan kira-kira 1 ft untuk memastikan bahwa muka tanah tersebut berada di atas ketinggian tanah endapan. Untuk menyesuaikan dengan standar perancangan bangunan lokal yang berlaku, pihak kontraktor akan mengambil tanah galian dari dalam area di dataran tinggi, untuk memastikan agar ketinggian tanah di area tersebut tidak berubah. Pihak kontraktor kemudian mengangkut tanah galian lempung pasir sebanyak 3.000 ft^3 yang akan diletakkan

dalam lapisan ketinggian vertikal tanah setebal 16 in. untuk dipadatkan menjadi setebal 12 in.

Ahli teknik pertanahan lalu mengadakan Pengujian Proctor Standar pada sebuah sampel yang diambil dari tanah galian, di mana beberapa nilai kepadatan kering tanah versus beberapa nilai kandungan kelembapan tanah menghasilkan sebuah grafik yang serupa dengan grafik pada Gambar 8.1. Nilai-nilai yang dihasilkan untuk kepadatan kering tanah optimum dan kandungan kelembapan tanah untuk tanah galian secara berurutan ditentukan sebesar γ_D = 114 pcf dan w = 15%. Grafik tersebut juga menunjukkan bahwa untuk mencapai kepadatan kering tanah optimum sebesar 95%, dengan γ = 108 pcf, tanah lapisan ketinggian vertikal harus memiliki kandungan kelembapan dalam kisaran sebesar 10% < w < 21% pada saat proses pemadatan tanah. Dengan menggunakan alat pengukur kelembapan, apabila pihak kontraktor berpendapat bahwa tanah tersebut terlalu basah, maka tanah dapat diberi pelepasan dengan penambahan kerikil dan diberi pengeringan-udara kira-kira selama satu hari, atau apabila tanah terlalu kering, maka penambahan air pada lapisan ketinggian vertikal mungkin diperlukan.

Pada tengah-hari, pihak kontraktor menyebarkan tanah galian dan menggunakan sebuah peralatan pengukuran kelembapan-kepadatan untuk mengukur kepadatan tanah sebesar γ = 105 pcf dan mendapatkan kandungan kelembapan di lapisan ketinggian vertikal tanah sebesar w = 16%. Pada titik ini, diadakan hujan buatan dengan durasi sepanjang siang hari dan terukurlah suatu kadar deras air hujan sebesar 1 in. Pihak kontraktor perlu mengetahui mungkin tidaknya dilakukan penambahan kandungan kelembapan di lapisan ketinggian vertikal tanah pada keesokan paginya dan langsung memadatkan lapisan tersebut, atau apakah perlu untuk membiarkan tanah mengering selama satu atau dua hari sebelum menyelesaikan pekerjaan pemadatan tanah.

Kepadatan kering tanah dari tanah galian, yang merupakan berat dari kandungan tanah yang solid dalam volume tanah sebesar 1 ft^3, dapat diestimasi dari pengukuran-pengukuran yang dilakukan sebelum hujan turun.

$$\gamma_D = \frac{\gamma}{1 + w} = \frac{105}{1{,}16} = 91 \text{ pcf}$$

Tiap-tiap ft^2 dari tanah galian yang disebarkan memiliki volume sebesar $\frac{16}{12}$ ft^3, dan satu inci dari air hujan ditambahkan ke setiap ft^2 dari tanah yang terekspos, yang memiliki berat air sebesar $\frac{1}{12}$ ft^3. Jadi, berat air per ft^3 adalah

$$W_w = 62{,}4 \text{ lb/ft}^3 \times \frac{1}{12} \text{ ft}^3 \div \frac{16}{12} \text{ ft}^3 = 3{,}9 \text{ lb/ft}^3$$

Dengan demikian, kandungan kelembapan dari tanah galian terlihat bertambah sebesar

$$w = \frac{W_W}{W_S} \times 100\% = \frac{3{,}9}{91} \times 100 \approx 4\%$$

Kandungan kelembapan setelah hujan buatan terlihat menjadi $w = 16 + 4 = 20\%$, yang berada dalam kisaran di mana kontraktor dapat mencoba memadatkan tanah hingga 95% dari kepadatan tanah optimum.

Keesokan paginya, pihak kontraktor mencampurkan air hujan tersebut dengan lapisan ketinggian vertikal tanah dan pada siang harinya meneruskan proses pemadatan tanah sehingga mencapai tinggi sekitar 12 in. Ahli teknik pertanahan kemudian mengambil sampel-sampel dari tanah dan menemukan bahwa kelembapan rata-rata dan kepadatan rata-rata dari tanah galian yang telah dipadatkan masing-masing adalah $w = 18{,}4\%$ dan $\gamma = 128$ pcf. Apakah pihak kontraktor telah mencapai kepadatan tanah optimum sebesar 95%? Sekali lagi, kita menghubungkan kepadatan kering tanah dengan kepadatan aktual tanah untuk menemukan bahwa kepadatan kering tanah yang telah dipadatkan adalah

$$\gamma_D = \frac{\gamma}{1 + w} = \frac{128}{1{,}184} = 108 \text{ pcf}$$

Jadi, pihak kontraktor telah dapat mencapai kepadatan tanah optimum sebesar 95%. Apabila γ_D pada kasus ini lebih kecil daripada 108 pcf, maka suatu proses pemadatan lebih lanjut mungkin diperlukan.

Latihan Untuk mencapai kepadatan tanah optimum sebesar 100% bagi lapisan subdasar dari sebuah jalan raya, berapa galon air yang perlu ditambahkan per ft dari alas jalan selebar 60 ft apabila tanah galian yang membentuk lapisan ketinggian vertikal setebal 9 in. memiliki kandungan kelembapan tanah sebesar 10% dan memiliki berat 110 pcf. Dari hasil Pengujian Proctor yang Dimodifikasi, kepadatan kering tanah optimum dan kelembapan tanah dari tanah galian ditentukan masing-masing sebesar $\gamma_D = 125$ pcf dan $w = 13\%$. ■

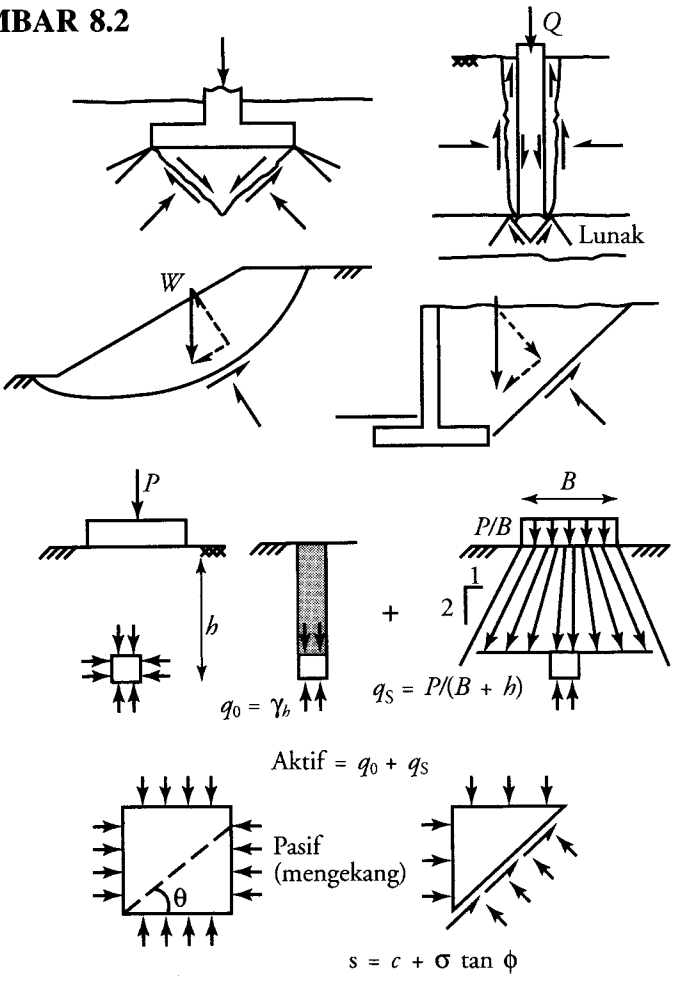
8.8 Kekuatan Tanah

Kekuatan tanah tidaklah sama seperti kekuatan bahan yang telah kita bahas untuk bahan kayu, bahan baja, dan bahan beton, karena kekuatan tanah umumnya tidak konstan—kekuatan tanah bertambah

adanya intensitas dari tegangan tekan yang aktif. Selain itu, kekuatan tanah lebih lemah dibandingkan dengan bahan-bahan lainnya, sehingga kekuatan tanah biasanya dinyatakan dalam *pounds* per ft^2 (psf), versus *pounds* per in^2. (psi). Sebagai contoh, tegangan tekan beton yang diizinkan pada sebuah kolom yang menyalurkan beban ke pengkakian mungkin bisa sebesar 1.000 psi, sedangkan tekanan dukung yang diizinkan antara pengkakian dan tanah mungkin bisa sebesar 2.000 psf atau hanya sebesar 14 psi. Tentu saja, kapasitas tegangan tanahnya yang rendah, membuat kita harus mengurangi tegangan intens yang dipikul melalui bagian-bagian struktur dengan cara menyebarkannya ke sebuah area yang besar untuk menyalurkan beban struktur tersebut ke dalam tanah. Coba Anda Tinjau yang satu ini: Berapakah tekanan yang terjadi antara ban dari sebuah kendaraan dengan tanah di mana ban tersebut berada?

Sesuai dengan istilahnya, kekuatan tanah, kita biasanya mengacu pada tegangan geser ultimat yang dapat ditahan oleh sebuah massa tanah

GAMBAR 8.2



sebelum mengalami kegagalan yang terjadi dalam bentuk penurunan relatif dari dua porsi massa tanah di sepanjang permukaan kegagalan. Beberapa contoh bidang yang mengalami kegagalan geser diperlihatkan pada Gambar 8.2. Kita melihat bahwa tegangan tekan aktif dari beban-beban struktur yang diterapkan pada tanah dapat menyebabkan terjadinya kegagalan geser, namun tanah itu sendiri juga bisa merupakan beban yang aktif yang menyebabkan kegagalan geser apabila gerakan-gerakan lateral dimungkinkan terjadi.

Gambar tersebut memperlihatkan sebuah kubus kecil dari tanah dengan volume satuan sebesar 1 ft^3 yang terletak pada kedalaman h di bawah ketinggian tanah yang mengalami tegangan vertikal dan lateral yang mengekang. Sebuah tegangan vertikal aktif terjadi pada kubus tanah tersebut, $q_0 + q_S$. Tegangan akibat kelebihan beban (*overburden*) atau beban tanah yang terletak di atas kubus adalah $q_0 = \gamma h$; kepadatan tanah, γ, biasanya berada dalam kisaran dari 90 pcf hingga 130 pcf. (Kepadatan dari tanah di bawah muka air tanah dikurangi oleh kepadatan dari air, γ_W = 62,4 pcf, karena objek yang terendam memiliki berat apung yang sama dengan berat objek itu sendiri dikurangi berat dari kandungan air yang ditempati oleh objek tersebut.) Tegangan di bawah struktur, q_S, berkurang dengan bertambahnya kedalaman, seperti yang diperlihatkan pada gambar, dan sebagai hasilnya, kegagalan geser cenderung terjadi di dekat dasar struktur.

Ketika tegangan aktif secara vertikal menekan tanah dan tanah mencoba melakukan gerakan lateral, tegangan lateral pasif akibat tanah-tanah di sisi-sisi tanah tempat struktur didirikan bereaksi untuk mengekang tanah, seperti yang diperlihatkan pada gambar. Apabila selisih dari tegangan aktif dan tegangan pasif cukup besar, kegagalan geser akan terjadi pada sebuah bidang yang berorientasi pada sudut, $\theta = 45^\circ + \phi/2$, dari bidang di mana tegangan aktif terjadi (ϕ adalah sudut geser dari tanah). Dengan memperhatikan secara lebih seksama bidang kegagalan ini, kita melihat bahwa tegangan bekerja pada bidang yang dapat dijelaskan dalam wujud dalam suku-suku persamaan matematika komponen tegangan geser, s, dan komponen tegangan jepit yang tegak lurus, σ.

Kekuatan geser dari tanah yang menahan terjadinya kegagalan pada sebuah bidang geser kritis berasal dari dua sumber: kohesi, gaya tarik magnetis bersama dari butiran-butiran tanah lempung, dan gesekan saling-mengunci antara partikel-partikel granular. Untuk jenis tanah tertentu, kohesi c adalah gaya tarik yang konstan antara partikel-partikel pada segala sisi bidang kegagalan. Geser antar butiran, seperti semua gesekan lainnya, bertambah sesuai dengan intensitas dari gaya jepit, σ, yang bekerja tegak lurus terhadap bidang geser. Seperti yang telah kita lihat sebelumnya dalam buku ini, koefisien friksi (gesekan) dari jenis bahan tertentu pada

kasus ini, tanah) yang memiliki sudut friksi, ϕ, adalah tan(ϕ), dan friksi intergranular tanah adalah $\sigma \times \tan(\phi)$. Jadi, kekuatan geser tanah dapat ditulis menjadi

$$s = c + \sigma \times \tan(\phi)$$

Suku c dan Suku ϕ dari rumus ini secara eksperimental dapat ditentukan oleh prosedur-prosedur pengujian dari laboratorium pengujian tanah seperti pengujian geser langsung, pengujian tekan yang tak terkekang, dan pengujian tekan triaksial, atau dapat ditentukan dari pengujian di lapangan seperti pengujian baling-baling (*vane test*) dan Pengujian Proctor Standar. Apabila tanah diklasifikasikan sebagai tanah lempung, friksi intergranular biasanya diabaikan ($\phi = 0$); apabila tanah tersebut diklasifikasikan sebagai tanah berpasir, maka kohesi diabaikan ($c = 0$).

Untuk tanah lempung, pengujian tekan yang tak terkekang sederhana digunakan untuk menentukan tegangan tekan aksial di mana sebuah sampel tanah berbentuk silinder dari tabung Shelby mengalami kegagalan. Tegangan ini dikenal dengan nama kekuatan tekan yang tak terkekang q_U, dan kohesi c dapat ditulis menjadi

$$c = \frac{q_U}{2}$$

Untuk tanah berpasir, Pengujian Penetrasi Standar umumnya digunakan untuk menentukan karakteristik-karakteristik dari tanah. Hitungan hembusan (*blow count*), N, dari Pengujian Proctor Standar terkait dengan data empiris dan dapat digunakan untuk memprediksi sudut friksi tanah, ϕ. Hubungan antara N dan ϕ (derajat) kira-kira menjadi

$$\phi = \frac{N}{4} + 28$$

8.9 Penurunan dan Konsolidasi Pondasi

Seperti halnya bahan lain yang sebelumnya telah kita bahas, ketika tanah harus menahan berbagai bentuk pembebanan, tanah juga harus mengalami deformasi. Menentukan deformasi yang terkait dengan tegangan pada tanah sedikit lebih rumit daripada menentukan deformasi yang terkait dengan tegangan pada baja, kayu, atau tegangan beton. Penurunan (*settlement*) di bawah pengkakian terjadi ketika tekanan yang dihasilkan oleh sebuah pondasi struktur yang baru dibangun mengurangi rasio rongga dari tanah dan menekan sebagian kandungan air ke luar dari rongga-rongga tanah, memaksa kandungan air tersebut mengalir ke tanah di sisi-sisi tanah tempat struktur tersebut dibangun. Struktur yang dibangun di atas tanah yang berpasir akan mengalami penurunan

segera setelah proses konstruksi selesai dan setelah mengalami pembebanan oleh beban hidup awal, karena pasir memiliki permeabilitas yang tinggi dan memungkinkan aliran air masuk melalui rongga-rongganya. Namun demikian, apabila sebuah lapisan tertentu yang lepas dari tanah lempung eksis di bawah pondasi, maka struktur akan terus mengalami penurunan selama bertahun-tahun karena tanah lempung tidak memiliki permeabilitas yang tinggi seperti halnya pasir, sehingga dibutuhkan waktu yang lama bagi air dalam rongga-rongga tanah untuk mengalami ekstrusi.

Penurunan yang terjadi pada sebuah lapisan tanah lempung yang kompresibel dikenal dengan nama konsolidasi. Semakin tinggi permeabilitas dari sebuah stratum tanah yang menjadi alas lapisan tanah lempung, semakin cepat air di atas tanah lempung dapat dikeluarkan. Pada Gambar 8.3, kita dapat melihat sebuah stratum tanah lempung yang kompresibel dengan ketebalan H berada di bawah pengkakian berbentuk persegi yang mengalami penurunan S sebagai hasil dari konsolidasi tanah lempung tersebut.

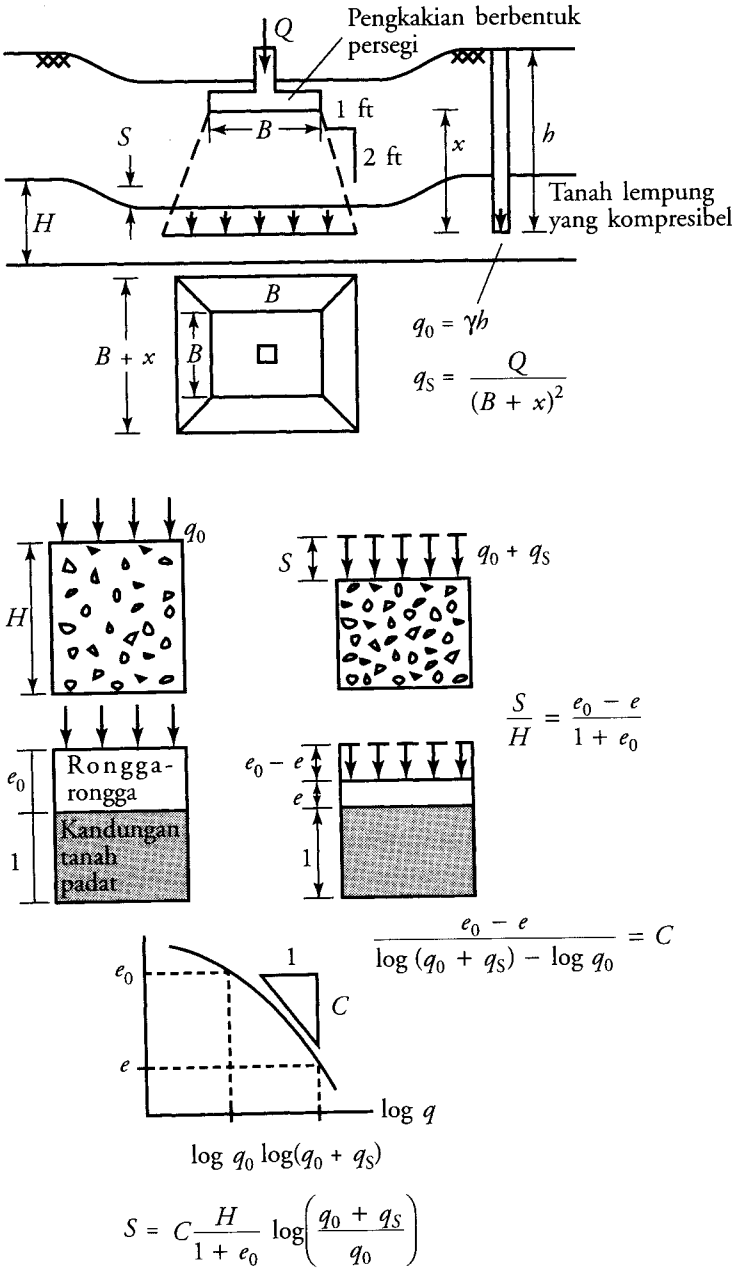
Tegangan tanah pada tengah-lapisan (tegangan rata-rata), yang berada pada kedalaman h, di bawah ketinggian tanah terlihat dihasilkan oleh tegangan akibat tekanan yang berlebihan, $q_0 = \gamma h$, dan tegangan yang ditambahkan q_S pada kedalaman x di bawah pengkakian berbentuk persegi dengan ukuran $B \times B$. Tekanan tanah yang ditambahkan akibat sebuah beban pada pengkakian Q biasanya diasumsikan tersebar pada area yang mengalami ekspansi sepanjang 1 ft pada keempat arah lateral untuk setiap 2 ft dari kedalaman yang bertambah di bawah ketinggian tanah, seperti yang diperlihatkan pada gambar. Jadi, pada kedalaman x di bawah pengkakian, tegangan akibat pengkakian adalah

$$q_S = \frac{Q}{(B + x)^2}$$

Dalam tekanan akibat kelebihan beban awal, $q_0 = \gamma h$, lapisan tanah lempung telah lama mengalami stabilisasi terhadap sebuah rasio rongga awal, e_0. Namun, dengan adanya tekanan tambahan dari pengkakian yang baru diletakkan selama periode bulanan atau tahunan, sebagai hasil dari tekanan rata-rata yang bertambah, $q_S + q_0$, rasio rongga pada akhirnya akan berkurang menjadi e pada saat air perlahan-lahan mengalami ekstrusi. Pada gambar tersebut, hubungan-hubungan ini secara skematis digambarkan pada sebuah massa tanah yang terlihat tersusun dari baik kandungan tanah yang padat maupun kandungan rongga-rongga tanah, dan kita melihat bahwa

$$\frac{S}{H} = \frac{e_0 - e}{1 + e_0}$$

GAMBAR 8.3



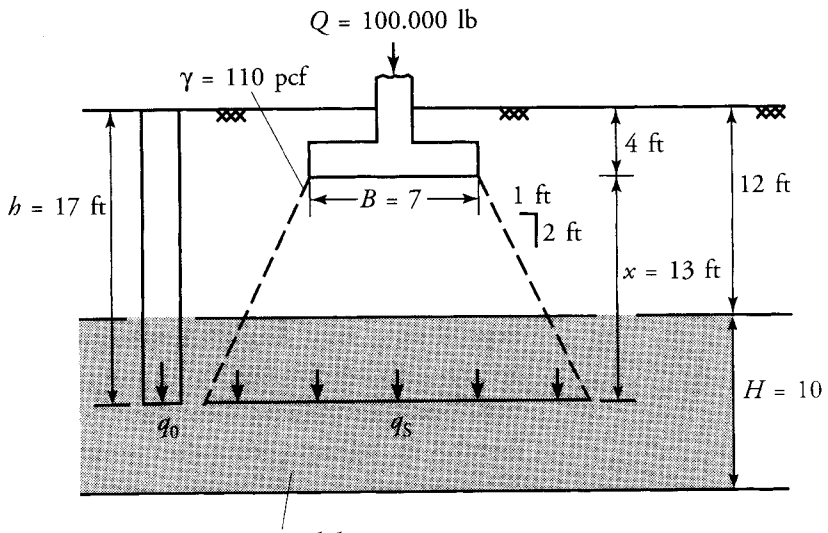
Sebelum proses konstruksi dimulai, sebuah sampel tabung Shelby diambil pada tengah-stratum dan dibawa ke laboratorium pengujian tanah di mana rasio rongga awal dari sampel, e_0, ditentukan dan pengujian konsolidasi juga dilakukan. Pengujian konsolidasi menghasilkan plot dari rasio rongga versus logaritma dari tekanan tanah yang diterapkan, yang serupa dengan yang diperlihatkan pada gambar. Apabila plot menggunakan

skala logaritmik, maka hubungan garis-lurus biasanya dapat diamati, dan kemiringan dari garis ini diistilahkan sebagai indeks tekan C, yang diberikan oleh

$$C = \frac{e_0 - e}{\log(q_0 + q_s) - \log(q_0)}$$

Nilai dari C biasanya berkisar dari 0,1 hingga 0,6. Dengan menggabungkan hubungan di atas dan menyusun kembali istilah-istilah matematisnya, kita mendapatkan sebuah hubungan yang berguna untuk memprediksi penurunan konsolidasi, S, dari lapisan tanah lempung yang kompresibel dengan ketebalan H, rasio rongga awal e_0, tekanan akibat kelebihan beban q_0, dan tekanan pengkakian tambahan q_S (keduanya dihitung pada tengah-stratum), dan indeks tekan C:

$$S = \frac{C \times H}{1 + e_0} \log \frac{q_0 + q_S}{q_0}$$



$e_0 = 1{,}1$
$C = 0{,}3$
$q_0 = \gamma h = 110(17) = 1.870$ psf

$$q_S = \frac{Q}{(B + x)^2} = \frac{100.000}{(7 + 13)^2} = 250 \text{ psf}$$

$$S = C\frac{H}{1 + e_0} \log \frac{q_0 + q_s}{q_0}$$

$$S = (0{,}3)\ \frac{(10 \times 12)}{(1 + 1{,}1)} \log \frac{1.870 + 250}{1.870}$$

$S = (17{,}1) \log (1{,}134) = 0{,}93$ in.
$S \approx 1$ in.

GAMBAR 8.4

Anggaplah sebuah lapisan tanah lempung yang kompresibel dengan ketebalan 10 ft berada 12 ft di bawah ketinggian tanah dengan rasio rongga yang ditentukan dari sebuah sampel tabung Shelby e_0 = 1,1. Pengujian konsolidasi memberikan indeks tekan C = 0,3. Kepadatan tanah rata-rata γ = 110 pcf, dan muka air tanah tidak ditemukan pada saat pengeboran tanah. Apabila pengkakian menumpu beban total Q = 100.000 lb, berapa penurunan konsolidasi S yang dapat diantisipasi apabila dasar dari sebuah pengkakian yang berbentuk persegi dengan B = 7 ft terletak 4 ft di bawah muka tanah. Sketsa pada Gambar 8.4 menggambarkan persoalan tersebut dan memperlihatkan perhitungan-perhitungan yang diperlukan untuk menentukan bahwa S = 1 in., pada kasus ini.

Latihan Anggaplah pengkakian yang berbentuk persegi kedua terletak di area yang sama dengan soal di atas. Pengkakian tersebut menumpu Q = 51.000 lb, dan lebar dari pengkakian tersebut B = 5 ft ditentukan agar kedua pengkakian memiliki tegangan dukung yang sama pada dasar kedua pengkakian tersebut. Apakah pengkakian kedua akan mengalami penurunan sebesar yang dialami oleh pengkakian pertama?

Kerjakan kembali soal ini dengan B = 7 ft dan dengan mengasumsikan bahwa muka air tanah ditemukan di bawah permukaan tanah. ■

8.10 Perbedaan Penurunan

Seperti yang akan kita lihat, penggunaan tegangan-tegangan dukung konservatif yang dizinkan untuk analisis pendahuluan memastikan bahwa bagian-pengkakian akan mengalami penurunan yang dapat ditoleransi di bawah 1 in., sehingga penurunan-penurunan tersebut biasanya tidak dicek. Tanpa mengabaikan hal tersebut, semua pengkakian untuk sebuah struktur harus didesain untuk memiliki tegangan-tegangan dukung yang serupa sehingga dapat mencegah penurunan diferensial, yang berarti bahwa pengkakian dapat mengalami penurunan yang lebih besar dibandingkan dengan pengkakian yang lainnya. Penurunan diferensial ini menyebabkan garis lantai yang tidak rata dan garis atap yang tidak rata, yang selanjutnya dapat menyebabkan jendela dan pintu pada plafon-plafon plester serta dinding-dinding batu melenting dan retak.

Pada sebagian struktur baja dan sebagian besar struktur beton yang dicor di tempat (dengan balok yang secara kaku dipasangkan ke kolom dengan sambungan momen), penurunan-penurunan diferensial bahkan dapat menyebabkan tegangan yang berlebihan pada bagian-bagian struktur. Pada Gambar 8.5, kita melihat tidak adanya tegangan yang terjadi pada

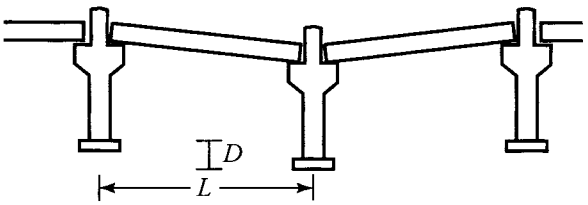
sebuah sistem balok beton pracetak dan kolom dengan penurunan diferensial pada kolom-kolom di sebelahnya—balok tersebut hanya mengalami sedikit kemiringan. Namun demikian, pada rangka momen, kita melihat bahwa balok mengalami lentur dalam dua lengkungan sebagai hasil dari penurunan relatif D dari garis-garis kolom yang bersebelahan, dan dapat diperlihatkan bahwa momen M yang terjadi pada sebuah balok dengan bentang L dan kekakuan EI adalah

$$M = D \times \frac{6EI}{L^2}$$

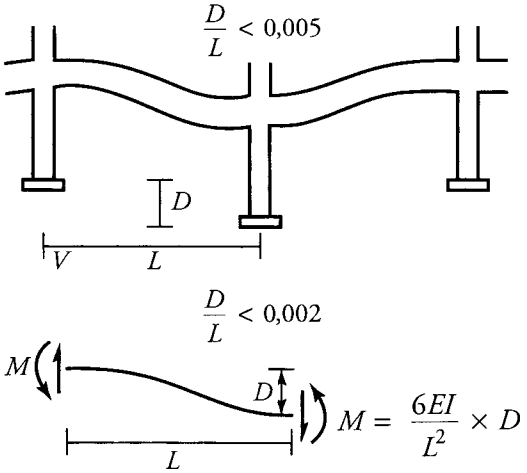
Sebagai contoh, anggaplah balok dari rangka momen tersebut memiliki bentang 25-ft (300 in.) dan mengalami penurunan diferensial $D = \frac{3}{4}$ in. Apabila anggota struktur adalah penampang baja W24 × 84 yang memiliki kekakuan $EI = 30.000.000 \times 2.300 = 69.000.000.000$ lb-in^2., maka momen yang terjadi adalah

$$M = \frac{3}{4} \times \frac{69.000.000.000 \times 6}{300^2} = 3.450.000 \text{ in-lb}$$

GAMBAR 8.5



Tidak ada tegangan akibat D pada rangka sederhana.



Tegangan-tegangan terjadi pada rangka-rangka momen.

Dengan mengetahui bahwa tegangan lentur adalah $f = M/S$, dan $S = 190$ in^3 untuk bentuk baja, tegangan lentur pada balok utama baja akibat pemindahan relatif sebesar $\frac{3}{4}$ in. pada ujung-ujung balok utama tersebut adalah $f = 345.000/190 = 18.200$ psi. Apabila beban hidup dan beban mati pada balok mengalami tegangan penuh hingga nilai f yang diizinkan = 24.000 psi, penurunan ini akan menyebabkan kelebihan tegangan sebesar 75%.

Standar-standar perancangan bangunan menetapkan berbagai batasan yang berbeda mengenai penurunan diferensial yang dapat ditoleransi. bergantung pada jenis sistem rangka yang digunakan. Untuk rangka sederhana, penurunan relatif yang diizinkan antara dua pengkakian yang terpisah dengan jarak L adalah $D/L < 0{,}005$. Untuk struktur-struktur rangka momen, $D/L < 0{,}002$.

Latihan

Berapakah penurunan diferensial yang menyebabkan tegangan tambahan sebesar 4.000 psi pada sebuah balok utama dengan bentang 50 ft yang secara kaku dipasangkan ke kolom-kolom pada kedua ujungnya? Momen inersia dari balok adalah 15.000 in^4, dan penampangnya mempunyai kedalaman 24 in.

Setelah kita membahas bab mengenai beton, Anda mungkin ingin menentukan berapa baja tambahan yang diperlukan pada sebuah balok beton yang dicor monolitik dengan kolom-kolom tumpuannya apabila balok tersebut memilik bentang 24 ft dengan lebar 16 in. dan kedalaman 30 in. ($A_S = M/21.600d$). Asumsikan $D/L = 0{,}002$. ■

9 STRUKTUR DALAM TANAH

9.1 PONDASI DANGKAL DAN PONDASI DALAM

Pada umumnya, pondasi digolongkan menjadi dua jenis, yaitu pondasi dangkal dan pondasi dalam. Pondasi dangkal adalah pondasi tapak penyebar beban atau pengkakian *(spread footing)* yang menyebarkan beban struktur pada suatu titik yang tidak jauh di bawah permukaan tanah. Dengan menggali tanah dan menempatkan pondasi tapak di bawah permukaan tanah dan di bawah garis beku, gaya pemuaian yang bersifat merusak yang dihasilkan oleh perubahan bentuk beku ke cair dapat dihindari, dan di samping itu, lapisan tanah pengisi dan tanah di sepanjang sisi pondasi mampu mendukung pondasi sehingga menambah kemampuan pondasi dalam menahan beban. Meskipun demikian, kedalaman pondasi tapak biasanya kurang dari 10 ft atau hanya berada sedikit di bawah permukaan tanah, sehingga tidak banyak waktu dan tenaga kerja yang diperlukan untuk menggali tanah.

Pondasi dangkal biasa digunakan untuk menopang struktur-struktur berat di atas suatu lapisan tanah keras berbatu, sedikit di bawah permukaan tanah. Pondasi dangkal juga sering digunakan untuk menahan beban-beban sedang dari bangunan-bangunan bertingkat menengah di atas lapisan tanah yang mempunyai daya dukung tinggi, seperti tanah berbutir. Pondasi dangkal digunakan pada tanah liat jika beban tidak terlalu besar. seperti untuk perumahan dan bangunan komersial bertingkat rendah. Penting untuk diperhatikan bahwa tanah lempung atau liat harus cukup kuat untuk mencegah penurunan tanah berlebihan, yang disebut konsolidasi, yaitu suatu kondisi di mana kandungan air dalam rongga-rongga tanah terperas keluar secara perlahan-lahan setelah beberapa bulan atau tahun. Uji konsolidasi di laboratorium tanah diperlukan bila memang terdapat konsolidasi tanah yang berlebihan.

Jika lapisan tanah di dekat permukaan tidak dapat menahan beban-beban struktur atau tanah cenderung mempunyai konsolidasi yang berlebihan, diperlukan pondasi yang lebih dari pondasi tapak. Di sinilah pondasi dalam diperlukan. Pilar bor yang dicor di tempat atau tiang pancang pracetak dapat digunakan untuk menyalurkan beban-beban struktur ke lapisan pasir atau batu yang kuat, atau menyalurkan beban-

beban tersebut melalui gesekan geser antara sisi tiang pancang dan tanah sepanjang tiang pancang tersebut.

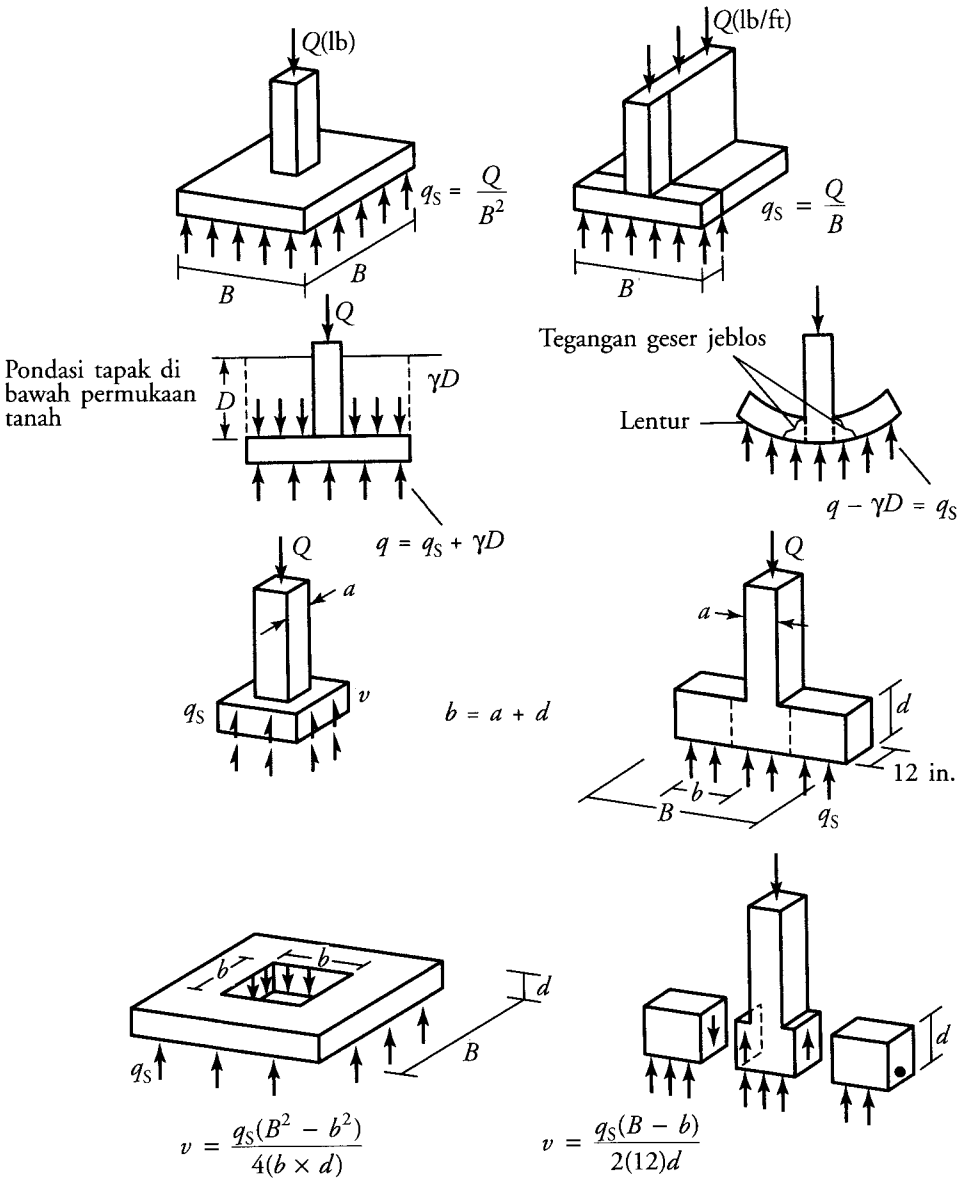
Karena lubang untuk pilar bor beton yang dicor di tempat harus dibuat sebelum penempatan tulangan baja dan penuangan beton, kedalamannya menjadi terbatas. Kedalaman antara 20-40 ft cocok untuk pilar berdiameter kecil, dan peralatan pengeboran yang lebih besar dapat menempatkan pilar berdiameter 6 ft atau lebih pada kedalaman berkisar 80 ft. Kedalaman tiang pancang baja, beton, dan kayu terbatas oleh kapasitas struktural tiang pancang, kemudahan pengangkatan yang tergantung dari panjang tiang pancang, dan kemungkinan tiang pancang tersebut untuk dipisahkan menjadi beberapa bagian. Tiang pancang dapat mencapai kedalaman sejauh 200 ft.

9.2 Pengkakian Tapak Penyebar Beban (*Spread Footing*)

Pada gambar 9.1 kita dapat melihat dua macam pondasi dangkal yang utama, yaitu pondasi tapak persegi dan pondasi tapak lajur menerus. Desain pondasi-pondasi ini menjamin disebarkannya beban struktur Q di atas suatu daerah yang cukup luas untuk mencegah tanah mengalami kelebihan tekanan, sehingga dinamakan pengkakian atau pondasi tapak penyebar beban *(spread footing)*. Jumlah tegangan pendukung di bawah dasar pondasi tapak adalah $q = q_S + \gamma D$, di mana tegangan akibat beban struktur adalah q_S, dan tegangan yang diakibatkan oleh tanah di atas pondasi tapak sedalam D di bawah permukaan tanah adalah γD. Berdasarkan tegangan dukung yang diizinkan untuk pondasi tapak, q_{IZIN}, kita dapat menentukan ukuran pondasi tapak B. Selanjutnya kita melakukan suatu perancangan struktur untuk menentukan ketebalan dan jumlah tulangan luntur yang diperlukan untuk pondasi tapak tersebut.

Tegangan dukung tanah yang diizinkan q_{IZIN} dipengaruhi oleh banyak parameter, termasuk ukuran dan kedalaman pondasi tapak, kekuatan geser tanah (suatu fungsi dari kohesi, gesekan internal, kepadatan tanah, dan intensitas beban), dan lokasi muka air tanah. Tegangan yang diijinkan untuk berbagai macam pondasi yang akan digunakan pada suatu jenis struktur khusus akan dinyatakan dalam laporan kondisi tanah dari insinyur geoteknik. Ada berbagai metode analisis dalam bidang geoteknik, dan masing-masing mungkin mempunyai hasil yang berbeda, tergantung dari asumsi yang digunakan, dan seberapa mirip kondisi lapangan dengan asumsi-asumsi tersebut. Oleh sebab itu, ahli tanah harus menggunakan keahliannya untuk menerapkan satu prosedur analisis yang paling cocok dengan kondisi lapangan yang ada.

Untuk desain awal, kita menggunakan nilai-nilai yang sudah sering dipakai untuk tegangan dukung yang diizinkan atas pondasi tapak pada



GAMBAR 9.1

tanah lempung atau tanah liat dan pasir. Tegangan dukung yang diizinkan ini didasarkan pada suatu faktor keamanan sekitar 3 yang mengacu pada kegagalan geser tanah. Pada tingkat tegangan yang rendah ini, pondasi tapak seharusnya menunjukkan penurunan yang masuk akal, sekitar 1 in., dan jika semua pondasi tapak berukuran sama sehingga menghasilkan tegangan dukung yang sama pula, masalah penurunan tanah dapat dikurangi sampai pada tingkat tertentu. Tegangan tanah yang diizinkan ini hanya digunakan sebagai penuntun pada pekerjaan desain awal dan

tidak dapat dipakai sebagai pengganti untuk semua penyelidikan dan analisis tanah.

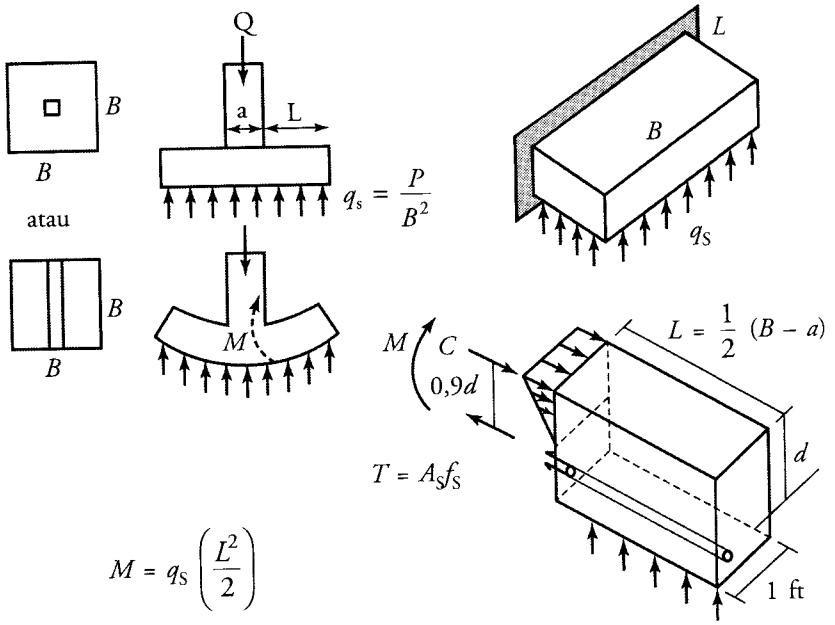
Untuk tanah liat, tegangan dukung yang diizinkan di bawah pondasi tapak berubah menjadi sekitar dua kali kohesi tanah. Karena kohesi adalah setengah dari kuat tekan tak terkekang *yang tak dibatasi (unconfined compressive strength)* ($c = q_U/2$), kita ambil $q_{IZIN} = q_U$. Nilai q_{IZIN} untuk tanah liat lunak = 1.000 psf, sedangkan untuk tanah liat kaku = 6.000 psf. Untuk pasir, tegangan dukung yang diizinkan didasarkan pada jumlah pukulan N dari pengujian Penetrasi Standar (SPT), dan diperkirakan di sini bahwa $q_{IZIN} = 250N$ (psf). Dengan nilai N berkisar antara 10 – 50, maka tegangan dukung yang diizinkan untuk pondasi tapak pada pasir berkisar antara q_{IZIN} = 2.500 psf untuk pasir longgar, sampai q_{IZIN}= 12.500 psf untuk tanah granuler rapat.

Setelah menggunakan nilai-nilai tersebut untuk menentukan ukuran pondasi tapak B, selanjutnya kita beralih pada perancangan strukturnya. Sebelumnya kita sudah menganalisis suatu pondasi tapak persegi dan membicarakan rumus yang menghubungkan tegangan geser dorong dengan ketebalan pondasi tapak untuk pondasi tapak persegi. Pada gambar, kita mengulangi rumus yang diperlukan untuk menghitung tegangan geser dorong untuk pondasi tapak persegi dan menyajikan kesamaan hubungan dengan pondasi tapak lajur.

Tegangan geser dorong yang diizinkan untuk beton adalah 70 psi, dan ini menentukan ketebalan pondasi tapak di atas tanah, seperti juga pondasi tapak yang didukung oleh tiang, yang biasa disebut kepala tiang pancang *(pile cap)*. Pada Gambar 9.2, kita lihat bagaimana analisis lenturan dari pondasi tapak persegi selebar 1 ft dan pondasi tapak lajur adalah sama. Perhatikan bahwa baja di bagian bawah untuk menahan lenturan hanya diperlukan dalam satu arah pada pondasi tapak lajur, sedangkan pada pondasi tapak persegi diperlukan dari kedua arah.

Pada gambar kita lihat balok beton kantilever dengan bentang L dan kedalaman atau tebal efektif d. Balok menahan momen lentur, $M = q_S L^2/2$, yang diakibatkan oleh kopel gaya kuat tekan beton, C, dan kuat tarik tulangan baja. Jika jumlah seluruh luas penampang tulangan baja dalam penampang melintang adalah A_S, dan tegangan tarik yang didapat adalah f_S, maka gaya tarik kopelnya adalah $T = A_S f_S$. Lengan momen kopel diambil sebesar 90% dari tebal efektif balok, $0{,}9d$. (Pembaca akan menemukan detail tentang desain beton bertulang lebih jauh dalam Bab 12).

Sebagai contoh, kita akan membandingkan sebuah pondasi tapak persegi berukuran B di atas tanah liat dan pasir rapat. Pondasi harus mendukung sebuah kolom dengan luas penampang 16 inci persegi yang membawa beban 200.000 lb. Untuk pondasi tapak di atas tanah liat, kita memperkirakan $q_{IZIN} = \frac{1}{2}$ (1.000 + 6.000) = 3.500 psf, sehingga luas



$$M = q_S\left(\frac{L^2}{2}\right)$$

$$T = A_S f_S = \frac{M}{0{,}9d}$$

$$A_S = \frac{M}{f_S 0{,}9d}$$

GAMBAR 9.2

daerah yang diperlukan adalah B^2 = 200.000/3.500 = 57 ft^2, maka B = 7,5 ft. Untuk pasir rapat, lebar B yang diperlukan adalah B = $\sqrt{200.000/12.500}$ = 4 ft.

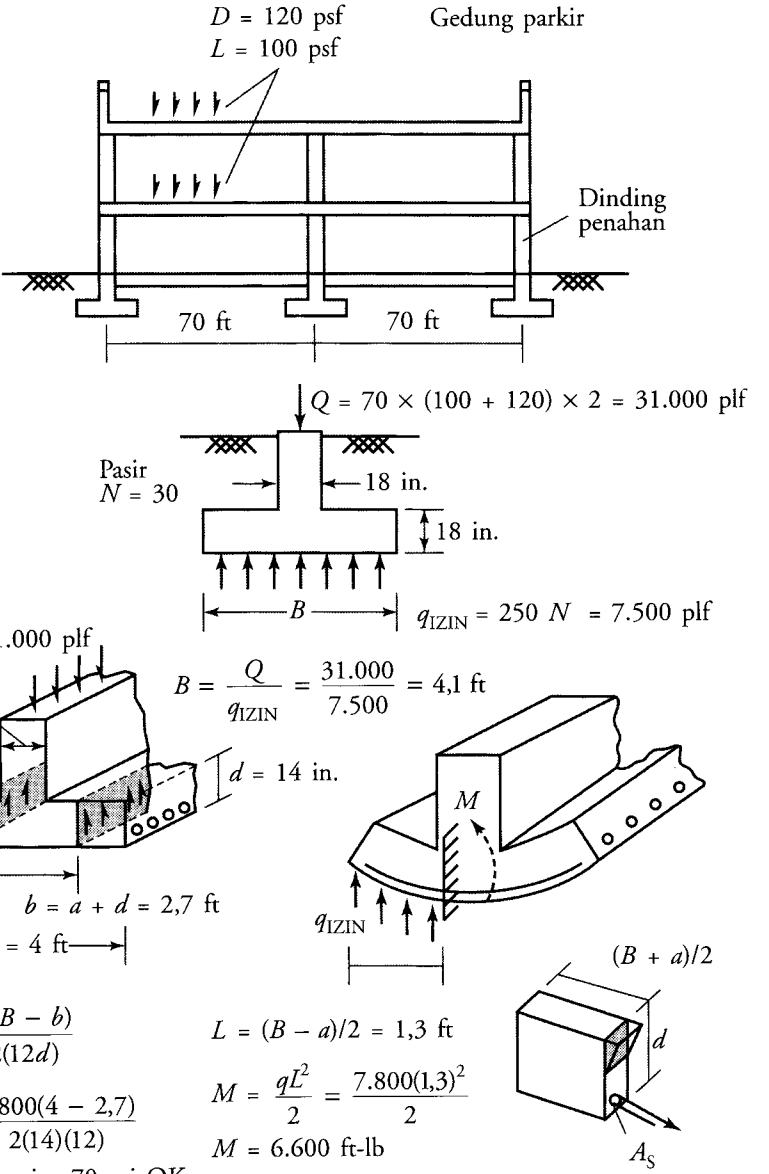
Berapa ketebalan pondasi tapak yang seharusnya? Dengan menggunakan rumus tegangan geser dorong untuk pondasi tapak pada tanah liat, kita asumsikan bahwa ketebalan pondasi tapak adalah 24 in., sehingga tebal efektif balok beton adalah $d = t - 4$ = 20 inci. Dimensi b adalah $\frac{16}{12} + \frac{20}{12}$ = 36 in. (3,0 ft). Tegangan geser dorong dapat dihitung dan dibandingkan dengan tegangan yang diizinkan.

$$v = \frac{3.500(7{,}5^2 - 3^2)}{4 \times 36 \times 20} = 57 \text{ psi} < 70 \text{ psi}$$

Anda dapat memverifikasi lebih jauh bahwa jika ketebalan diubah menjadi t = 20 in. untuk kedua pondasi tapak, tegangan geser dorong menjadi 84 psi untuk pondasi tapak pada tanah liat, dan 54 psi untuk pondasi tapak pada pasir.

9.3 Desain Pondasi Tapak Lajur

Perhatikan struktur beton dari gedung parkir pada Gambar 9.3 yang mempunyai dua lantai parkir mobil pada lantai dasar dan lantai 1. Untuk analisis awal, beban mati dari struktur diperkirakan D = 120 psf dan beban hidup dari mobil adalah L = 100 psf. Struktur untuk fasilitas



$$B = \frac{Q}{q_{IZIN}} = \frac{31.000}{7.500} = 4{,}1 \text{ ft}$$

$$v = \frac{q(B - b)}{2(12d)}$$

$$v = \frac{7.800(4 - 2{,}7)}{2(14)(12)}$$

v = 30 psi < 70 psi OK

$L = (B - a)/2 = 1{,}3$ ft

$$M = \frac{qL^2}{2} = \frac{7.800(1{,}3)^2}{2}$$

M = 6.600 ft-lb

$$A_S = \frac{M}{f_S(0{,}9\ d)} = \frac{6.600(12)}{24.000(0{,}9 \times 14)} = 0{,}26 \text{ in}^2/\text{ft}$$

Gunakan tulangan baja no.4 dengan jarak 9 inci dari as ke as

GAMBAR 9.3

seperti itu biasanya memperkenankan penggunaan dinding penahan dan pondasi tapak lajur di atas tanah pasir, seperti terlihat pada gambar. Kita akan menentukan lebar pondasi tapak yang diperlukan B, memeriksa tegangan geser, dan menentukan tulangan lentur yang diperlukan untuk pondasi tapak tersebut. Ketebalan 18 in. diasumsikan untuk kaki tiang dan ketebalan pondasi tapak. Beban dari tanah diabaikan dalam perhitungan pondasi dangkal ini.

Kita dapat menganalisis struktur sepanjang 1 kaki untuk menentukan beban Q yang didistribusikan sepanjang pondasi tapak. Karena slab di atas tanah mendukung lantai dasar, pondasi tapak sepanjang bagian tengah struktur mendukung beban mati dan beban hidup dari dua lantai struktur yang lain.

$$Q = 2 \times \left[\frac{1}{2}(70 + 70) \times (120 + 100)\right] = 31.000 \text{ lb/ft}$$

Untuk tanah pasir dengan jumlah pukulan Pengujian Penetrasi Standar $N = 30$, tegangan dukung yang diizinkan adalah

$$q_{\text{IZIN}} = 250(N) = 250(30) = 7.500 \text{ psf}$$

Tegangan adalah gaya per satuan luas, dan luas daerah pendukung di bawah pondasi tapak sepanjang 1 ft dengan lebar B adalah $B \times 1$, atau disederhanakan menjadi B ft^2, sehingga lebar pondasi tapak yang diperlukan menjadi

$$B = \frac{Q}{q_{\text{IZIN}}} = \frac{31.000}{7.500} = 4{,}1 \text{ ft}$$

Jika kita gunakan $B = 4$ ft, tegangan dukung aktual adalah

$$q = \frac{Q}{B} = \frac{31.000}{4} = 7.800 \text{ psf}$$

Kelebihan tegangan yang dapat diterima hanya 3%.

Kemudian kita memeriksa tegangan geser dorong yang terjadi pada dua asumsi kegagalan yang diperlihatkan, dengan memperhatikan bahwa tebal efektif beton diperkirakan adalah ketebalan dikurangi 4 inci, atau $d = 14$ in. Seperti yang telah kita bicarakan sebelumnya, lebar dorongan pada dinding adalah $b = h + d = 18 + 14 = 32$ in. (2,7 ft), dan dari rumus tegangan geser dorong untuk pondasi tapak lajur didapatkan

$$v = \frac{q(B - d)}{24d} = \frac{7.800(4 - 2{,}7)}{24 \times 14} = 30 \text{ psi}$$

Tegangan geser yang terjadi di bawah tegangan yang diizinkan adalah 75 psi, sehingga, ketebalan pondasi tapak sudah memadai.

Akhirnya, kita menentukan tulangan lentur baja yang diperlukan yang membujur tegak lurus terhadap dinding sepanjang dasar pondasi tapak dengan menganalisis sebagian pondasi tapak dari permukaan kaki kolom sampai ke ujung dasar pondasi sebagai balok kantilever. Beban merata yang uniform disederhanakan menjadi q untuk 1 ft lebar balok dan dari rumus untuk lentur pondasi tapak, momen yang terjadi adalah

$$M = \frac{q(B/2 - a/2)^2}{2} = \frac{7.800(1,3)^2}{2} = 6.600 \text{ ft-lb/ft}$$

Momen per kaki panjang dinding ini memerlukan luasan tulangan lentur per kaki sebesar

$$A_S = \frac{M}{21.600d} = \frac{6.600 \times 12}{21.600 \times 14} = 0,26 \text{ in}^2/ft$$

Kita dapat menggunakan tulangan baja no. 4 berjarak 9 ft dari as ke as. Ingat bahwa sebuah tulangan mempunyai diameter $\frac{4}{8}$ in. dan luas penampang 0,2 in^2. Jika diletakkan dengan jarak 9 in., luas per kaki lebar (lebar 12 in.) adalah $12/9 \times 0,2 = 0,27$ in^2.

Latihan Asumsikan dinding penahan digantikan oleh kolom persegi 18 in. berjarak 20 ft dari as ke as. Desainlah sebuah pondasi tapak persegi untuk masing-masing kolom. ■

9.4 Tiang Pancang dan Pilar Bor

Seringkali, beban struktural terlalu besar sehingga kita tidak dapat menggunakan pondasi tapak dalam ukuran yang pantas. Hal itu bisa disebabkan oleh kekuatan tanah yang rendah maupun oleh penurunan yang berlebihan. Dalam hal ini, pondasi dalam harus digunakan untuk menyalurkan beban struktur ke massa tanah yang lebih besar, atau menyalurkan beban-beban tersebut ke lapisan tanah keras atau lapisan batu. Pondasi dalam terdiri dari tiang pancang atau *pilar bor.*

Tiang pancang beton, baja, atau kayu dapat diibaratkan sebagai paku besar yang ditancapkan ke tanah oleh alat pemancang. Pilar bor adalah pilar beton yang dicor di tempat, yang dibentuk dengan menuang beton ke lubang berbentuk silinder dengan pengebor tanah yang besar. Pada umumnya, pilar bor digunakan bila efek dinamis dari tiang pancang mengganggu struktur sekitarnya, seperti di daerah perkotaan atau perumahan yang padat.

Jarang sekali tiang pancang digunakan untuk mendukung suatu pondasi secara sendiri-sendiri. Biasanya, sekelompok tiang pancang digunakan untuk mendukung suatu pondasi tapak persegi, atau sederet tiang pancang diletakkan di bawah pondasi tapak lajur yang mendukung sebuah dinding. Tiang pancang bisa berbentuk tiang persegi atau bundar, dan dibuat dari beton pracetak, kayu, atau baja berbentuk pipa atau H. Kapasitas struktural suatu tiang pancang atau pilar bor ditentukan oleh luas penampang melintangnya dikalikan dengan tegangan yang diizinkan sebesar 1.000 psi untuk tiang pancang beton dan pilar bor, 1.000 psi untuk tiang pancang kayu, dan 12.000 psi untuk tiang pancang baja. Kapasitas tiang pancang dan pilar bor, serta kekuatan tanah, menentukan beban yang diizinkan pada tiang.

Tiang pancang beton biasanya merupakan tiang pratekan yang ukurannya berkisar sampai 36 in. dan panjangnya sampai 60 ft atau lebih, kadang-kadang juga dapat dipisahkan menjadi beberapa bagian dan dipancang lebih dalam. Beberapa bagian beton mutu tinggi berbentuk silinder berlubang dapat diberi tegangan pascatarik *(post-tensioned)* secara bersamaan untuk membentuk tiang pancang dengan diameter 6 ft dan dapat dipancang sampai kedalaman lebih dari 100 ft. Tiang pancang kayu diambil dari pohon-pohon dengan mutu yang baik. Ukuran tiang pancang kayu terbatas, sesuai dengan ukuran pohon yang tersedia. Umumnya, tiang pancang kayu mempunyai diameter efektif 12 in. dan panjang 50 ft. Tiang pancang baja yang paling sering digunakan adalah kelompok baja khusus yang berbentuk W dengan tebal badan (*web*) dan sayap (*flens*) yang hampir sama, sering disebut tiang pancang H yang tersedia dalam berbagai macam panjang dan mudah dipisahkan menjadi beberapa bagian untuk mencapai kedalaman 100 ft atau lebih. Tiang pancang H biasanya diperlakukan sebagai tiang pancang persegi ketika kita menentukan beban izin tiang pancang berdasarkan kapasitas tanah.

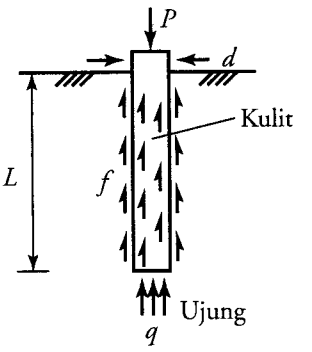
Karena tidak memerlukan transportasi ke lapangan dan digunakan sebagai pengganti tiang pancang, pilar bor biasanya mempunyai panjang yang sama dengan tiang pancang, tetapi mempunyai diameter yang lebih besar, berkisar antara 18 in. sampai 8ft. Jika tanah tidak cukup kuat, sisi lubang yang dibor harus dijaga dari kemungkinan keruntuhan dengan memasang suatu bubur semen lekat padat, yang sering disebut lumpur bor *(drilling mud),* di dalam lubang. Setelah campuran beton basah pemadat ditempatkan di dasar lubang dengan menggunakan selang yang fleksibel, bubur beton menggantikan tempat lumpur bor dari puncak lubang. Dalam banyak kasus, dasar lubang dilebarkan untuk membentuk pilar dengan dasar berbentuk lonceng demi mencapai kapasitas daya dukung yang lebih tinggi.

Secara umum, tiang pancang dan pilar bor bekerja mendukung beban dengan cara yang sama dan kita akan memperlakukannya dengan cara

yang sama pula. Karena tanah pada ujung suatu pilar bor tidak dipadatkan seperti pada tiang pancang, tegangan dukung yang diizinkan pada ujung pilar bor adalah sepertiga tegangan dukung tiang pancang. Pada praktiknya, insinyur geoteknik sering meminta satu atau lebih tiang pancang percobaan untuk dipancang guna memastikan keakuratan tegangan desain tanah dari hasil pengujian tanah yang sudah dilakukan.

Dengan Gambar 9.4 sebagai acuan, kita lihat sebuah tiang pancang dengan lebar/diameter d dan panjang L mendukung sebuah beban P dengan tegangan gesek kulit f dan tegangan dukung ujung q, mengikuti hubungan berikut ini:

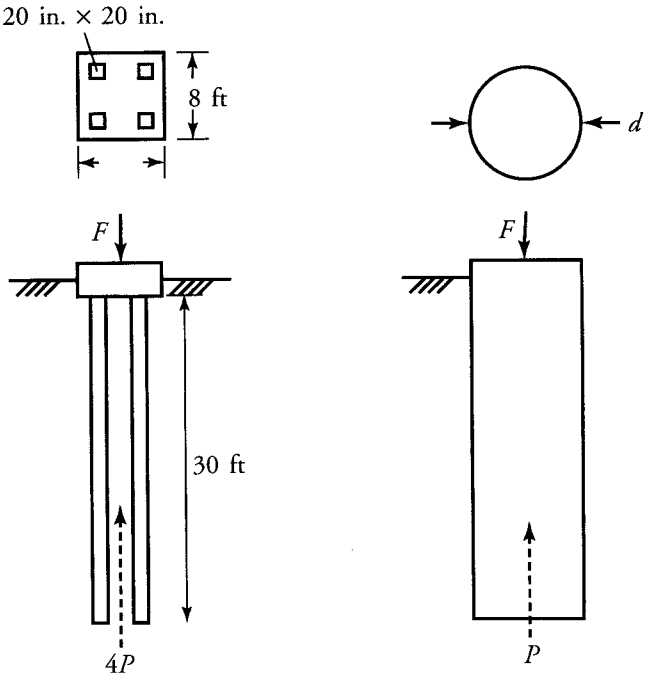
$$P = f \times A_{\text{KULIT}} + q \times A_{\text{UJUNG}}$$



$$P = f \times A_{\text{KULIT}} + q \times A_{\text{UJUNG}}$$

$$A_{\text{KULIT}} = \pi dL \text{ bundar}$$
$$= 4dL \text{ persegi}$$

$$A_{\text{UJUNG}} = \frac{\pi}{4} d^2 \text{ bundar}$$
$$= d^2 \text{ persegi}$$



GAMBAR 9.4

Untuk tiang pancang bundar dan persegi, luas permukaan kulit yang mengalami gesekan adalah $A_{KULIT} = \pi dL$ dan $4dL$, dan luas permukaan ujung tiang pancang bundar dan persegi masing-masing adalah $A_{UJUNG} = \pi(d^2/4)$ dan d^2.

Seperti yang kita lakukan pada pondasi tapak, kita akan menggunakan faktor keamanan sekitar 3 untuk menentukan tegangan tanah yang diizinkan, f dan q. Gesekan permukaan kulit pada tanah liat adalah adhesi antara tanah dan permukaan kulit, yang kira-kira sama dengan kohesi tanah c, sehingga tegangan gesek yang diijinkan untuk kuat tekan tak terkekang (*unconfined compressive strength*) dari tanah liat adalah $f = 0{,}15q_u$. Tegangan dukung ujung pada tanah liat didasarkan pada data empiris dan dirumuskan sebesar $q = 1{,}5q_U$ ($0{,}5q_U$ untuk pilar bor). Tegangan yang diizinkan untuk tiang pancang pada tanah pasir secara empiris berhubungan dengan jumlah pukulan pengujian penetrasi standar N, dan tegangan yang diizinkan (psf) untuk tiang pancang pada tanah pasir mendekati $f = 8N$ untuk gaya gesek permukaan kulit, dan $q = 2.400N$ ($800N$ untuk pilar bor) untuk tegangan dukung ujung. (Untuk tiang pancang, nilai-nilai ini dapat ditingkatkan 50% jika digunakan tiang pancang percobaan, sehingga didapatkan faktor keamanan efektif sebesar 2 dan bukan 3.)

Sebagai contoh, pada gambar, anggaplah bahwa ada suatu perubahan rencana, di mana empat tiang pancang beton dengan luas penampang 20 in. persegi yang akan dipancangkan pada tanah liat sedalam 30 ft, dengan $q_U = 3.000$ psf, sampai ke lapisan pasir, di mana $N = 30$, akan digantikan oleh sebuah pilar bor. Anggap ujung pilar bor juga ditahan pada pasir. berapa diameter pilar bor yang diperlukan untuk menghasilkan pondasi dengan kapasitas beban yang sama dengan empat tiang pancang tersebut?

Kapasitas total dari kelompok tiang pancang tersebut adalah empat kali kapasitas satu tiang pancang P. Kapasitas struktural tiang pancang berdasarkan tegangan tekan beton adalah

$$P = 1.000(20^2) = 400.000 \text{ lb}$$

Untuk beban izin tiang pancang yang didasarkan pada kapasitas tanah. tegangan gesek permukaan kulit yang diizinkan pada tanah liat adalah $f = 0{,}15(3.000) = 450$ psf, dan tegangan dukung ujung yang diizinkan pada pasir adalah $q = 2.400(30) = 72.000$ psf. Luas permukaan kulit dan adalah $A_{KULIT} = 4\ (20/12)(30) = 200$ ft^2 dan $A_{UJUNG} = (20/12)^2 = 2{,}8$ ft^2 sehingga kapasitas yang diizinkan dari sebuah tiang pancang berdasarkan kapasitas tanah adalah

$$P = 450(200) + 72.000(2{,}8) = 90.000 + 202.000 = 292.000 \text{ lb}$$

Jadi, beban pondasi yang diizinkan berdasarkan kapasitas tanah adalah $F = 4 \times 292.000 \approx 1.170.000$ lb. (Perhatikan bahwa pondasi ini dapat digunakan untuk mendukung sebaris kolom dari bangunan setinggi 10 lantai yang diperlihatkan pada Gambar 4.3)

Untuk pilar bor, tegangan dukung ujung yang diizinkan q diasumsikan sebesar sepertiga tegangan dukung ujung tiang pancang, atau $q = 24.000$ psf, dan luas permukaan kulit dan ujung adalah $A_{\text{KULIT}} = \pi d(30) = 94d$ dan $A_{\text{UJUNG}} = \pi/4(d)^2 = 0{,}79d^2$ dan

$$1.170.000 = 450 \times 94d + 24.000 \times 0{,}79d^2$$

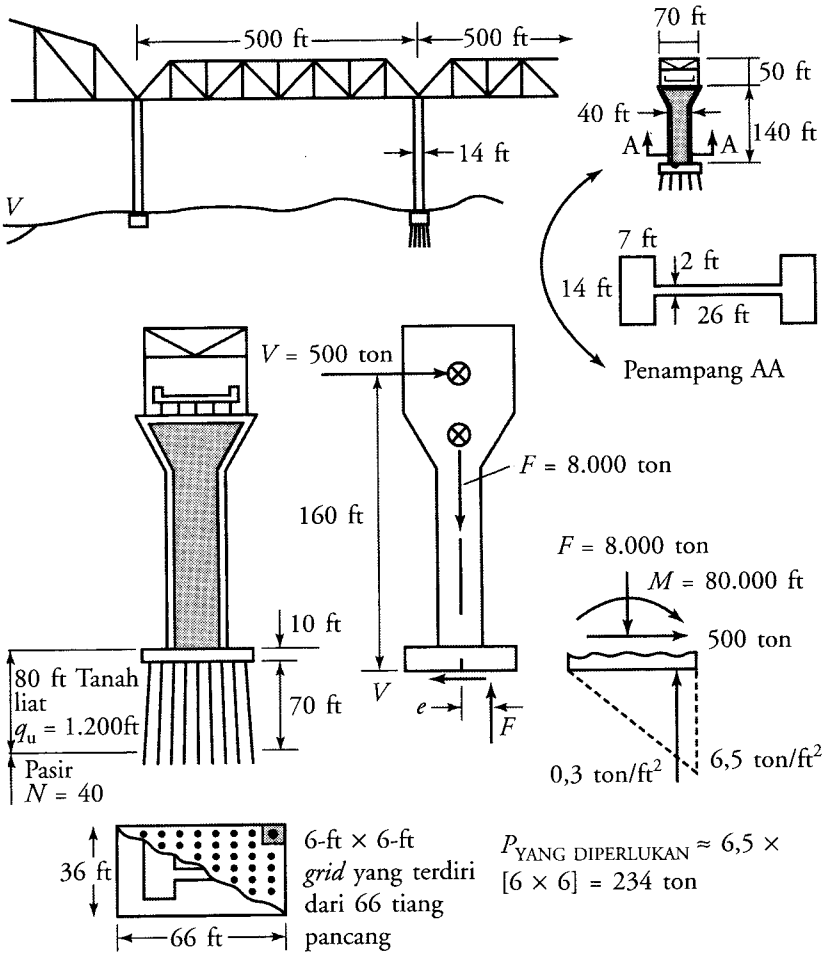
Dengan menggunakan persamaan kuadrat, atau hanya dengan coba-coba, kita mendapatkan $d = 6{,}8$ ft. Kita melihat bahwa pilar mempunyai daya dukung sebesar 290.000 lb melalui gesekan pada tanah liat, dan 880.000 lb dari dukungan ujung pada tanah pasir.

Latihan Berapa tiang pancang persegi dengan penampang 14 in. × 14 in. dan panjang 60 ft yang diperlukan untuk mendukung beban $F = 500.000$ lb pada tanah liat? Untuk sebuah pilar bor dengan panjang 40 ft, berapakah diameter yang diperlukan? ■

9.5 Analisis Tumpuan Jembatan di Atas Tiang Pancang

Pada Gambar 9.5, kita lihat suatu tumpuan jembatan beton setinggi 140 ft, biasanya dikenal sebagai substruktur, yang mendukung dua rangka batang baja yang masing-masing mempunyai bentang 500 ft (superstruktur atau struktur bagian atas) yang merupakan bentang awal dari sebuah struktur jembatan yang lebih panjang yang menyeberangi Sungai Mississippi. Penampang melintang batang tumpuan jembatan menyerupai sebuah balok I dengan bagian sayap 14 ft × 7 ft dan bagian badan 26 ft × 2 ft. Batang tumpuan selebar 40 ft terlihat meluas selebar 70 ft pada puncaknya untuk mendukung rangka batang yang dilalui jalan raya 4 lajur. Beban tiang tumpuan disebarkan ke 66 tiang pancang pendukung melalui sebuah tapak *pile cap* persegi 36 ft × 66 ft dengan tebal 10 ft.

Tiang pancang persegi terbuat dari beton pratekan bersisi 18 in. yang masing-masing mempunyai kapasitas struktural $P = 230$ ton. Tiang pancang menahan beban melalui gesekan permukaan kulit pada lapisan tanah liat setebal 80 ft di lapisan atas dengan kuat tekan terkekang $q_U = 1.200$ psf, dan dukungan ujung pada lapisan pasir padat di bawahnya dengan jumlah pukulan Pengujian Penetrasi Standar, $N = 40$. Perhatikan bahwa tiang pancang terluar dipasang sedikit miring untuk menahan gaya lateral V yang diakibatkan angin yang bekerja pada pondasi tapak



GAMBAR 9.5

Spesifikasi desain jembatan mengindikasikan bahwa beban kritis tiang pancang dihasilkan dari beban lateral yang disebabkan oleh kekuatan angin topan yang menerpa seluruh struktur, ditambah beban vertikal dari beban mati dua rangka batang dan tumpuan jembatan ditambah tapak. Jadi, tumpuan jembatan berlaku seperti balok-kolom kantilever yang ditancapkan ke tanah melalui tapak dan tiang pancang pendukungnya dengan beban vertikal F = 8.000 ton, dan beban lateral angin V = 500 ton, dengan titik berat yang terletak pada 160 ft di atas dasar tapak, seperti yang terlihat pada gambar. Biaya-biaya ini menghasilkan gaya aksial ekivalen, geser, dan momen pada puncak tiang pancang seperti terlihat.

Untuk memeriksa apakah kelompok tiang pancang tersebut sudah memadai, pertama-tama kita memeriksa semua gaya tarik yang mungkin terjadi pada tiang pancang, di mana gaya tarik ini terjadi jika eksentrisitas

beban, $e = M/F$ lebih besar daripada $B/6$. Kita lihat bahwa $M/F = 80.000/8.000 = 10$ ft, dan $B/6 = 66/6 = 11$ ft, sehingga $e < B/6$ dan semua tiang pancang mengalami tekanan. Kita menghitung tegangan dukung gabungan di bawah pondasi tapak seperti jika pondasi tapak berada di tanah dan bukan di atas tiang pancang, dengan menggunakan rumus tegangan gabungan

$$q = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{S} = \frac{8.000}{36 \times 66} \pm \frac{80.000}{36 \times \frac{66^2}{6}} = 3{,}4 \pm 3{,}1 \text{ ton/ft}^2$$

Jadi tegangan dukung ekivalen bervariasi dari $q = 0{,}3$ ton/ft^2 di sebelah kiri sampai $q = 6{,}5$ ton/ft^2 di sebelah kanan (tentu saja, nilai-nilai ini terbalik jika topan dan angin bertiup dari arah yang berlawanan).

Karena kita hanya perlu memperhatikan tiang pancang dengan beban yang paling berat, kita terapkan tegangan dukung maksimum pada luasan daerah pembebanan yang harus menopang beban dan memperkirakan kapasitas beban tiang pancang yang diperlukan, yaitu

$$P_{\text{YANG DIPERLUKAN}} = 6{,}5 \times (6 \times 6) = 234 \text{ ton}$$

Nilai ini cukup mendekati kapasitas struktural yang aman dari tiang pancang persegi bersisi 18 in. dan berpanjang 15 ft, yaitu sebesar 230 ton dan dapat dikatakan memadai secara struktural untuk pekerjaan di atas.

Berikutnya, kita memeriksa kapasitas tiang pancang berdasarkan kekuatan tanah. Kita menyatakan bahwa ketika tiang pancang percobaan digunakan, yang pasti terjadi pada struktur seperti ini, kapasitas tiang pancang dinaikkan 50%:

$$P = 1{,}5 \times [0{,}15q_U \times 4dL + 2.400N \times d^2] \text{ lbs}$$

$$P = 1{,}5[0{,}15(1.200) \times 4(1{,}5)(80 - 10) + 2.400(40)(1{,}5^2)] = 437.000 \text{ lb}$$

Jadi, kapasitas tiang pancang berdasarkan kekuatan tanah adalah $P = 219$ ton, 6% di bawah P yang diperlukan = 234 ton. Karena tiang-tiang pancang terluar yang menerima beban kritis juga harus menahan beberapa gaya horisontal akibat angin, $V = 500$ ton, sangat bijaksana jika kita mencoba tiang pancang yang lebih besar, misalnya tiang pancang persegi bersisi 20 in.

Latihan

Apakah tiang pancang persegi bersisi 20 in. mampu menyediakan kapasitas tiang pancang yang diperlukan sebesar $P = 234$ ton berdasar kekuatan tanah dan faktor keamanan sebesar 2?

Jika sebagai pengganti pasir padat, ujung tiang pancang didukung oleh lapisan tebal tanah liat kaku dengan $q_U = 5.000$ psf, berapakah panjang tiang pancang persegi bersisi 20 in. yang diperlukan untuk struktur bagian bawah jembatan (semua tiang pancang bersisi 20 in.)? ■

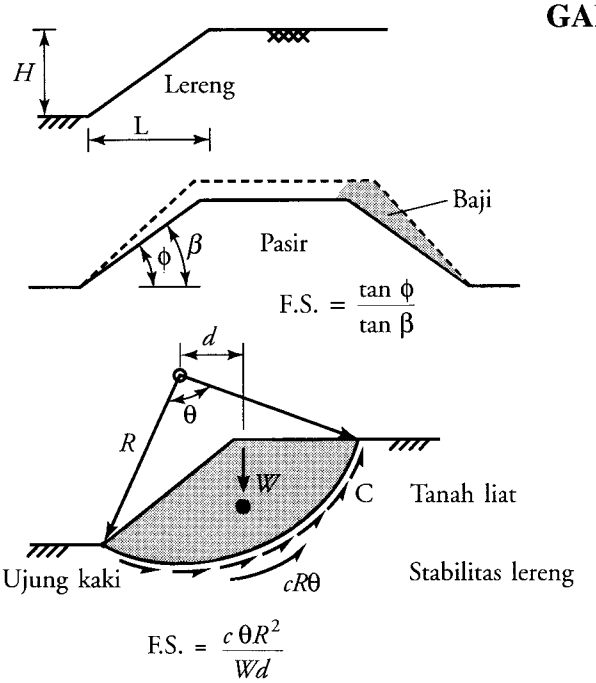
9.6 Stabilitas Kemiringan Permukaan Tanah

Seringkali kita perlu atau ingin membuat suatu perubahan kemiringan permukaan tanah, baik yang landai maupun yang curam, misalnya untuk teras lansekap, tanggul, dan timbunan jalan raya. Jika perubahan permukaan tanah tersebut landai, dibuatlah lereng atau tanah miring yang dipadatkan, sedangkan jika perubahan kemiringan cukup curam. diperlukan suatu struktur penahan tanah. Pada suatu kemiringan permukaan tanah, kita harus mengetahui dari analisis stabilitas apakah lereng tersebut akan runtuh, atau apakah dinding akan miring atau longsor. Biasanya diperlukan suatu faktor keamanan, antara 1,5 sampai 3.

Pada Gambar 9.6, kita dapat melihat bagaimana faktor keamanan terhadap ketidakstabilan lereng untuk tanah yang berkohesi dan tidak berkohesi diperoleh. Telah disebutkan sebelumnya bahwa pada suatu tanah pasir yang dituangkan ke suatu tiang, sisi-sisinya akan membentuk kemiringan secara alami pada sudut gesek materialnya, atau sudut letak ϕ. Untuk menjamin stabilitas lereng dengan suatu faktor keamanan, sudut kemiringan lereng β harus kurang dari ϕ. Faktor keamanan terhadap keruntuhan lereng yang mungkin membentuk baji pasir longsor seperti daerah yang diarsir pada gambar adalah

$$\text{F.S (factor of safety)} = \frac{\tan(\phi)}{\tan(\beta)}$$

GAMBAR 9.6



Sebagai contoh, jika timbunan pasir membentuk sudut $\beta = 30°$ dengan permukaan tanah dan sudut gesek tanah $\phi = 38°$, kita dapat mengatakan bahwa lereng mempunyai suatu faktor keamanan terhadap longsor sebesar

$$\text{Faktor keamanan} = \frac{\tan(38°)}{\tan(30°)} = \frac{0{,}781}{0{,}577} = 1{,}35$$

Nilai ini mengindikasikan bahwa lereng aman, tetapi tidak terlalu.

Pada campuran tanah yang umum, terutama pada tanah liat dengan gesekan antar butiran yang dapat diabaikan, keruntuhan lereng biasanya terjadi pada suatu bidang yang membentuk busur lingkaran seperti diperlihatkan. Lereng seperti itu tidak stabil jika momen pada pusat busur yang diakibatkan berat W yang bekerja pada pusat massa tanah yang diarsir melebihi momen penahan dari gaya geser kohesif, $c \times R \times \theta$, sepanjang bidang busur. Untuk bidang kritis keruntuhan, faktor keamanan terhadap ketidakstabilan ini adalah

$$\text{Faktor keamanan (F.S.)} = \frac{c \times \theta \times R^2}{W \times d}$$

Pada analisis stabilitas, tidak dapat diketahui kombinasi pusat busur dan jari-jari busur mana yang mempunyai nilai paling kritis. Jadi, variasi beberapa busur harus dicoba sampai didapatkan satu kombinasi yang menghasilkan nilai minimum F.S., yang telah ditemukan dengan menggunakan persamaan di atas.

Kita akan mengestimasi F.S. untuk busur percobaan dari lereng tanah liat pada gambar jika $H = 10$ ft dan $L = 10$ ft. Jika digambar dengan skala, daerah yang diarsir akan mempunyai luas 120 ft^2, dan titik berat daerah yang diarsir terdapat tepat di bawah titik di mana lereng bertemu dengan permukaan tanah sebelah atas. Seperti yang sudah umum dilakukan, pusat busur diletakkan di pertengahan di atas bidang miring lereng, dari mana busur dibuat melalui kaki lereng. Selanjutnya kita dapat menentukan jari-jari busur R dan sudut apit θ.

Dalam kasus ini, $R = 15$ ft, $\theta = 95°$ (1,7 radians), dan $d = L/2 = 5$ ft. Nilai kohesi $c = 800$ psf dan kepadatan tanah $\gamma = 120$ pcf. Karena berat lereng selebar 1 ft adalah $W = \gamma V = 120\ (120 \times 1) = 14.400$ lb, kita dapatkan

$$\text{Faktor keamanan (F.S.)} = \frac{800 \times 1{,}7 \times 15^2}{14.400 \times 5} = 4{,}3$$

Penting untuk diingat bahwa beberapa busur percobaan harus dianalisis sebelum nilai F.S. yang paling kritis dapat ditentukan.

Bentuk lain untuk menjaga stabilitas kemiringan permukaan tanah adalah dinding penahan (*retaining wall*). Untuk menahan dengan baik

suatu lereng vertikal yang tinggi, dua jenis dinding beton penahan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 9.7 dapat digunakan. *Gravity wall* adalah struktur dinding penahan yang paling sederhana. Dinding ini menahan efek guling dari gaya lateral yang disebabkan oleh baji pengganti dari tanah penahan melalui efek stabilitas dari berat tanah yang menyebar di bawah lebar dasar dinding. Jika ada air yang terperangkap di belakang dinding, air ini akan menambah suatu tekanan hidrostatis senilai $p = \gamma_W H$ pada dasar dinding setinggi H. Untuk alasan ini, tanah penahan biasanya adalah suatu material pengisi yang merupakan campuran pasir tanpa kohesi atau kerikil yang dapat merembeskan air dengan cepat. Tindakan pencegahan harus dilakukan sehingga air di tanah pengisi dapat merembes dengan mudah dari belakang dinding, misalnya melalui saluran air berlubang yang diletakkan sejajar dengan dasar dinding dan dihubungkan dengan lubang alir terbuka sepanjang dasar dinding.

Tekanan lateral terbatas dari tanah penahan mendorong dinding keluar, mengakibatkan sedikit pergeseran dinding yang mengaktifkan baji tanah penahan, menyebabkannya berpindah ke bawah dan bersandar pada dinding dengan tekanan lateral yang signifikan. Hanya sedikit pergeseran yang diperlukan untuk menyebabkan kegagalan geser aktif sepanjang bidang pada arah $45° + \phi/2$. Tekanan lateral pada semua kedalaman di bawah puncak dinding adalah suatu fraksi K dari tekanan kelebihan pembebanan yang terkait. Untuk butiran pengisi dengan daya alir yang baik, K dapat mempunyai nilai paling rendah 0,2. Nilai K yang paling tinggi adalah 1 untuk pengisi kohesif yang jenuh. Dengan nilai $K = 0{,}4$, tekanan lateral P pada dasar dinding mencapai nilai maksimum, yaitu

$$p = K\gamma H = 0{,}4\gamma H$$

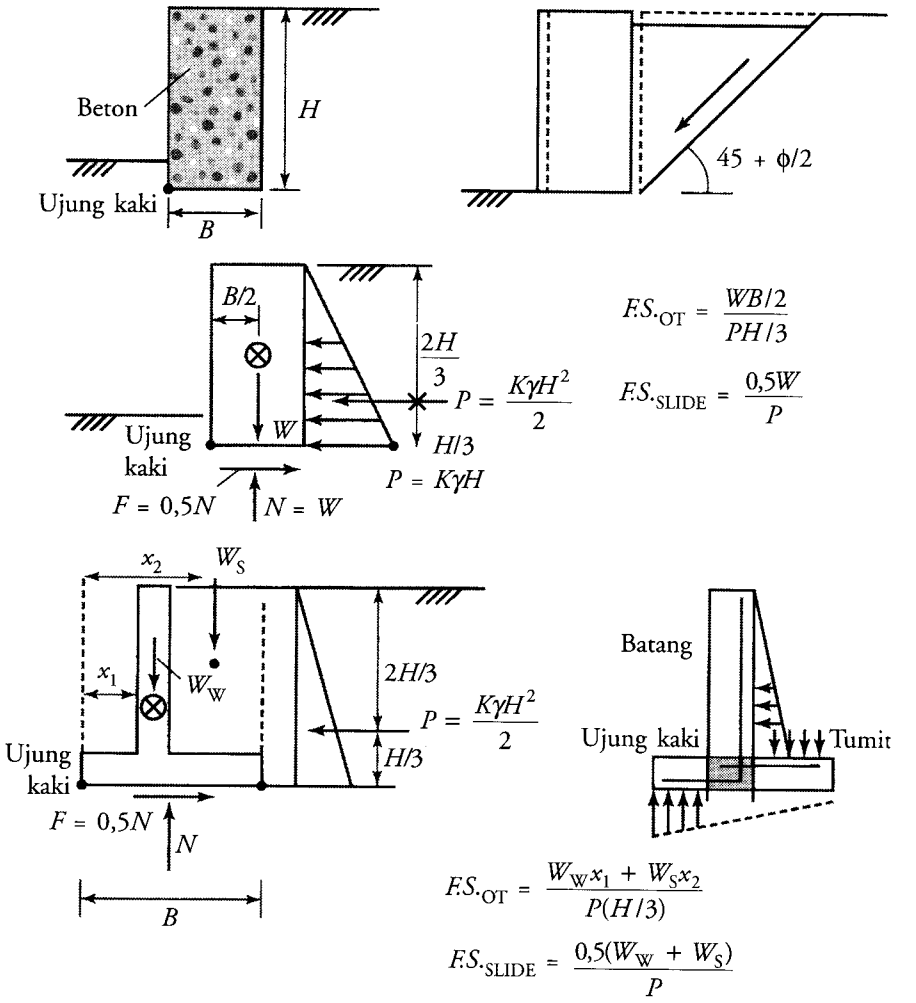
Tekanan ini didistribusikan dengan bentuk segitiga seperti diperlihatkan dan gaya yang dihasilkan per kaki lebar dinding P adalah rata-rata tekanan dikalikan dengan ketinggian dinding,

$$P = \frac{1}{2} K\gamma H^2$$

Gaya lateral ini bekerja pada titik berat luasan segitiga distribusi tekanan, $H/3$, dan menghasilkan momen guling pada kaki dinding yang sama dengan $PH/3$. Momen yang bekerja pada ujung kaki dinding ini juga sebesar berat dinding dikalikan lengan momen, $WB/2$, sehingga faktor keamanan terhadap guling adalah

$$\text{F.S.}_{\text{OT}} = \frac{WB/2}{PH/3}$$

Dinding juga harus menahan gelincir horisontal yang diakibatkan efek gaya lateral P dengan mengembangkan gaya gesek F antara dasar dinding



GAMBAR 9.7

dan tanah, sehingga koefisien gesek dikalikan gaya apit, $N = W$. Koefisien gesek antara tanah dan beton dapat diambil sebesar 0,5, sehingga faktor keamanan terhadap gelincir adalah

$$\text{F.S.}_{\text{GELINCIR}} = \frac{0{,}5W}{P}$$

Anggaplah *gravity wall* pada gambar mempunyai tinggi 12 ft dan bahan pengisinya adalah tanah pasir dengan kepadatan tanah $\gamma = 110$ pcf. Berapakah lebar dasar B yang diperlukan untuk menghasilkan faktor keamanan sekitar 2 dengan memperhitungkan guling dan gelincir? Berat $W = \gamma_{\text{BETON}} BH = 1.800B$, dan gaya guling lateral diasumsikan $P = \frac{1}{2}(0{,}4)\gamma H^2 = 3.170$ lb sehingga untuk faktor keamanan sebesar 2 terhadap guling,

$$\text{F.S.}_{\text{OT}} = \frac{WB/2}{PH/3} = 2 = \frac{900B^2}{12.700}$$

Kita mendapatkan B = 5,3 ft. Untuk keamanan terhadap gelincir,

$$\text{F.S.}_{\text{SLIDE}} = 2 = \frac{0{,}5W}{P} = \frac{900B}{3.170}$$

Dari sini, B = 7 ft, yang diambil untuk kasus ini.

Kita melihat dari gambar bahwa dibandingkan *gravity wall* masif yang membutuhkan berat yang besar dan dasar yang lebar untuk menghasilkan momen yang memadai, dinding penahan kantilever dibangun dari 2 elemen tipis beton saja, batang dan dasar. Struktur penahan jenis ini mengandalkan berat tanah pengisi untuk menghasilkan momen ke kanan yang cukup untuk menahan efek guling tekanan lateral secara aman. Seperti yang diperlihatkan pada gambar, batang vertikal dan bagian ujung kaki dan tumit pada dasar masing-masing bekerja sebagai balok kantilever yang menahan beban terdistribusi ketika dinding bereaksi terhadap gaya yang bekerja, dan tulangan lentur akan diperlukan oleh bagian balok yang mengalami tarik.

Pemeriksaan stabilitas untuk dinding kantilever ini mengikuti cara yang sama seperti *gravity wall.* Sekarang momen ke kanan yang terjadi di ujung kaki adalah jumlah dari berat struktur dan tanah sehingga

$$\text{F.S.}_{\text{OT}} = \frac{W_{\text{W}}(x_1) + W_{\text{S}}(x_2)}{PH/3}$$

Faktor keamanan terhadap gelincir didasarkan pada gaya apit dari berat struktur dan tanah pengisi

$$\text{F.S.}_{\text{SLIDE}} = \frac{0{,}5(W_{\text{W}} + W_{\text{S}})}{P}$$

Sebagai tambahan pada pemeriksaan stabilitas dinding penahan secara keseluruhan, mereka juga harus dianalisis sebagai tapak dengan tekanan dukung tak merata. Bagian sebelumnya dari buku ini sudah membahas bagaimana lebar dasar B mestinya memadai untuk mencegah terjadinya kehilangan daya dukung di sisi bawah pengisi struktur.

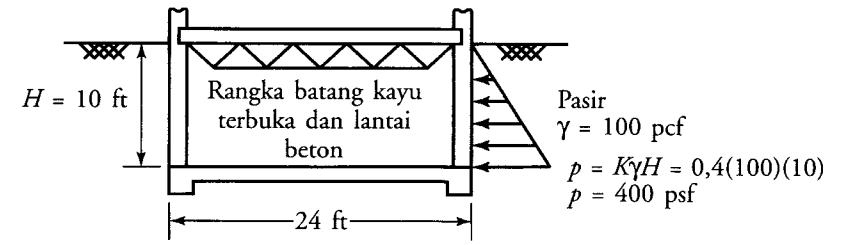
9.7 Dinding Ruang Bawah Tanah (*Basement*)

Dinding *basement* mempunyai kemiringan muka tanah seperti struktur dinding penahan yang telah kita bicarakan. Setelah penggalian dan pembangunan pelat beton dan dinding beton atau dinding batu, tanah

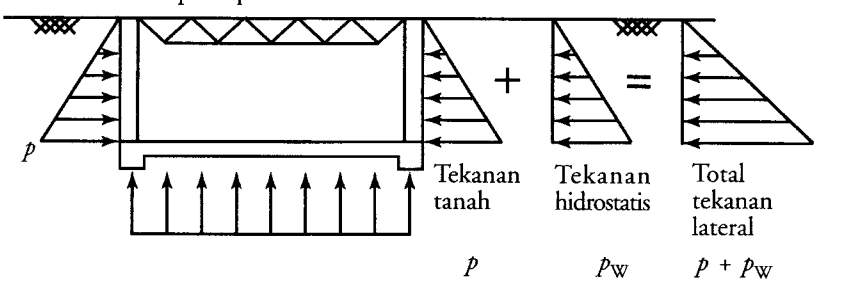
hasil galian atau butiran tanah yang lebih permeabel digunakan sebagai pengisi dan diletakkan berhadapan dengan dinding di area penggalian terbuka yang masih tersisa. Karena lantai di atas dinding *basement* berlaku sebagai penopang lateral untuk mencegah bagian atas dinding dari perpindahan lateral, dinding basement tidak mudah dipindahkan dari pengisi dan mengakibatkan keruntuhan massa tanah sepanjang bidang geser seperti pada gravity wall dan dinding kantilever. Selain itu Juga masih ada tegangan lateral dari tanah pengisi yang dibatasi oleh dinding basement, dan tekanan lateral ini biasanya diperkirakan dengan cara yang sama dengan dinding penahan.

Gambar 9.8 menunjukkan penampang melintang sebuah basement dengan tinggi dinding 10 ft yang menahan pengisi tanah pasir dengan

GAMBAR 9.8



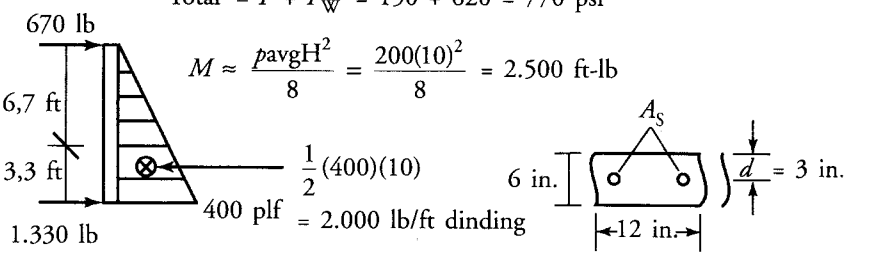
Muka air tanah pada permukaan tanah



$$P_W = \gamma_W H = 62{,}4(10) = 620 \text{ psf}$$

$$p = K(\gamma - \gamma_W)H = 0{,}4(100 - 62{,}4)(10) = 150 \text{ psf}$$

$$\text{Total} = P + P_W = 150 + 620 = 770 \text{ psf}$$



$$A_S = \frac{M}{21.600d} = \frac{2.500(12)}{21.600(3)} = 0{,}46 \text{ in}^2/\text{ft}$$

Gunakan tulangan no. 6 dengan jarak as ke as 12 in.

kepadatan γ = 100 pcf dan koefisien tegangan lateral K = 0,4. Kita melihat dinding menerima beban merata lateral berbentuk segitiga yang mempunyai nilai maksimum pada dasar sebesar

$$p = K\gamma H = 0{,}4(100)(10) = 400 \text{ psf}$$

Jika muka air tanah dimungkinkan untuk naik ke permukaan tanah, tekanan pada dinding bertambah. Pada dasar dinding, tekanan lateral adalah jumlah dari tekanan tanah dengan kerapatan apung *(rumus)* dan tekanan hidrostatis, atau

$$p = K(\gamma - \gamma_W)H + \gamma_W H = 0{,}4(100 - 62{,}4)(10) + 62{,}4(10) = 770 \text{ psf}$$

Sebagai tambahan, berhubung tekanan hidrostatis sama ke segala arah, ada tekanan ke atas di bawah plat basement sebesar $\gamma_W H$ = 620 psf yang dapat mengangkat struktur ke atas tanah jika tidak ada berat yang cukup ke arah yang berlawanan. Untuk alasan ini, dan juga karena basement mempunyai kecenderungan bocor seperti saringan, basement tidak umum digunakan pada lokasi di mana muka air tanah dapat naik sampai di atas lantai basement.

Kita lihat pada gambar bahwa dinding selebar 1 ft dibentuk sebagai plat dengan bentang sederhana setinggi 10 ft yang menerima beban merata segitiga. Perhatikan bahwa berat dinding itu sendiri untuk slab dinding vertikal ini tidak mempunyai kontribusi dalam beban lentur melintang yang bekerja pada balok dengan bentang 10 ft. Untuk kasus di mana tidak ada muka air tanah, beban lateralnya adalah sebesar

$$P = \frac{1}{2}(p)(H) = \frac{1}{2}(400)(10) = 2.000 \text{ plf}$$

Gaya ini bekerja pada titik berat segitiga, seperti diperlihatkan, dan kesetimbangan balok mengindikasikan bahwa gaya yang memegang bagian atas dan bawah masing-masing kaki dinding tetap pada tempatnya adalah 670 lb dan 1.330 lb.

Kita ingin menentukan tulangan lentur yang diperlukan jika sebuah tulangan baja vertikal ditempatkan pada pusat dinding beton yang mempunyai tebal 6 in. Momen dapat diperkirakan dengan mengasumsikan beban lateral, P = 2.000 lb didistribusikan merata sepanjang dinding setinggi 10 ft, sehingga momen maksimum balok sederhana, $M = wL^2/8$, diperoleh dari

$$M = \frac{(P/H)H^2}{8} = \frac{(2.000/10)10^2}{8} = 2.500 \text{ ft-lb} = 30.000 \text{ in-lb}$$

Dengan mengingat persentase baja, A_S/bd kurang dari 1,4%, yang akan diambil untuk menghitung A_S = 0,014 (12 × 3) = 0,5 in.^{2}/ft lebar, selanjutnya luas permukaan baja yang diperlukan ditentukan sebesar

$$A_S = \frac{M}{21.600 \times d} = \frac{30.000}{21.600 \times 3} = 0{,}46 \text{ in}^2/\text{ft lebar}$$

Jadi kita dapat menggunakan baja no. 6 berjarak 12 in. dari as ke as di tengah-tengah dinding basement untuk menulanginya terhadap tekanan tanah lateral.

Latihan

Jika basement harus dibangun dengan muka air tanah pada permukaan tanah, berapa gaya angkat ke atas yang terjadi pada struktur jika basement mempunyai lebar 24 ft dan panjang 34 ft?

Asumsikan bahwa slab lantai *basement* berlaku sebagai balok sederhana dengan bentang 24 ft untuk menahan tekanan hidrostatis ke atas, kemudian tentukan tebal slab dan tulangan lentur yang diperlukan, yang diletakkan dekat bagian atas slab. ■

10 PENERAPAN PADA DESAIN STRUKTUR KAYU

10.1 TEGANGAN YANG DIIJINKAN UNTUK KAYU, BAJA, DAN BETON

Pada Bab-Bab akhir dari buku ini, kita akan membicarakan sistem bangunan yang umum yang terbuat dari kayu, baja, dan beton bertulang. Kita sudah membicarakan banyak sistem semacam itu dalam buku ini, dan sekarang kita akan membicarakan lebih detail tentang beberapa sifat unik dari elemen-elemen struktur yang terbuat dari ketiga bahan bangunan tersebut.

Ketika kita menganalisis atau mendesain elemen-elemen struktur, kita harus memastikan suatu tingkat keamanan agar tidak terjadi kegagalan struktur. Hal ini dapat kita lakukan dengan dua cara:

1. Kita dapat membatasi tegangan yang bekerja, yang disebabkan oleh beban aktual, sejauh tegangan yang diijinkan, yaitu sekitar setengah dari tegangan yang mengakibatkan keruntuhan struktur. Jadi, terdapat faktor keamanan sekitar dua. Metode ini disebut *metode tegangan kerja.*
2. Kita dapat mengalikan beban aktual dengan suatu faktor beban, kira-kira sebesar dua kali, dan mendesain struktur pada beban yang jauh lebih tinggi dari beban aktual. Metode ini disebut *metode faktor beban.*

Pada akhirnya, tingkat keamanan dari kedua metode tersebut adalah sama, dan tidak dapat dipisahkan satu dengan yang lain. Setiap metode mempunyai keterbatasan yang sering memerlukan kerja yang lebih banyak dalam menganalisis atau mendesain suatu struktur. Di saat penggunaan metode faktor beban mulai meningkat, masih banyak orang yang menggunakan metode tegangan kerja, dan kebanyakan struktur yang sudah ada memang masih didesain dengan metode ini. Karena lebih mudah untuk dimengerti dan diimplementasikan, kita akan menggunakan metode tegangan kerja ini dalam menganalisis dan mendesain struktur kayu, baja, dan beton, seperti yang sudah kita lakukan selama ini.

Keruntuhan struktur biasanya didefinisikan sebagai kelebihan tegangan pada suatu titik di elemen struktur yang melampaui batas elastis

bahan bangunan yang dipakai pada struktur tersebut. Peningkatan tegangan melebihi batas ini akan menyebabkan perubahan bentuk yang bersifat tidak elastis dan permanen walaupun beban sudah dipindahkan. Dengan menjamin bahwa tegangan kerja pada struktur cukup rendah, kita tidak hanya mencegah keruntuhan struktur, tapi juga menjamin bahwa perubahan bentuk yang disebabkan beban-beban dapat kembali secara elastis dan struktur tidak berubah karena beban tersebut. Tegangan yang diijinkan pada metode tegangan yang bekerja ini bervariasi, tergantung pada banyak hal, seperti jenis tegangan-tarik, tekan, dukungan, geser atau lentur, dan pada sifat-sifat bahan seperti mutu dan jenis kayu, campuran kimia baja, dan bahan-bahan campuran beton.

Dalam hal tegangan lentur, sebagai contoh, tegangan kayu yang diijinkan berkisar antara 900-1.800 psi, tergantung dari jenis pohon dari mana kayu berasal, dan pada derajat dan letak cacat alami kayu (bintik, celah, susut, dan sebagainya). Untuk baja, tegangannya bergantung pada batas elastisitas baja, yang disebut juga tegangan leleh baja. Tegangan lentur yang diijinkan pada struktur baja secara umum adalah 24.000-33.000 psi. Kekuatan beton yang normal mempunyai tegangan lentur yang diijinkan sebesar 1.200-2.200 psi pada bagian yang tertekan oleh momen, dan diasumsikan pula bahwa beton tidak mempunyai kekuatan tarik, di mana kekuatan tarik ini disediakan oleh tulangan baja pada tegangan tarik baja yang diijinkan sampai 24.000 psi.

Dengan semakin majunya teknologi struktur, beberapa variasi dari ketiga bahan bangunan tersebut yang dapat menahan tegangan yang lebih tinggi juga telah berkembang. Beberapa lapisan tipis kayu, dan bahkan potongan-potongan kayu bisa ditempelkan menjadi satu kesatuan utuh untuk membentuk semacam lapisan kayu yang lebih besar, disebut *glulam*, yang mempunyai tegangan ijin lebih tinggi karena adanya penyebaran tegangan, dan dengan demikian efek negatif dari cacat alami kayunya juga berkurang. Baja sudah dapat diproduksi dengan tegangan leleh hampir dua kali tegangan leleh baja A36 yang umum yaitu 36.000 psi, sehingga tegangan ijin pun dapat dinaikkan. Beton normal mempunyai kuat tekan antara 2.500-4.000 psi, tetapi campuran beton dengan kuat tekan 20.000 psi sudah digunakan pada struktur-struktur khusus. Semua kemajuan dalam kekuatan bahan bangunan ini juga membawa beberapa masalah di dalamnya. Tenaga kerja yang diperlukan untuk melaminasi kayu menjadi lebih banyak. Elemen baja yang didesain untuk tegangan kerja yang lebih tinggi berbentuk lebih ramping sehingga lebih rawan terhadap terjadinya tekuk, dan seringkali sangat sulit untuk menjaga campuran beton agar benar-benar tepat dan menghasilkan beton bermutu tinggi.

Karena kita menutup buku ini dengan tiga bab yang membicarakan analisis dan desain beberapa sistem struktur yang umum, pembaca disarankan untuk melihat ringkasan dari jenis-jenis tegangan kerja yang

	Tarik	Tekan	Dukung	Geser	Lentur	E
Kayu	800	1.000	500	90	1.200	1.600.000
Baja	22.000	22.000	36.000	14.000	24.000	30.000.000
Beton	0	1.800	1.000	70	1.800	3.500.000

diijinkan secara umum untuk kayu, baja, dan beton dengan kekuatan normal. Macam-macam tegangan yang terdiri dari tarik aksial, tekan aksial pada suatu bagian pendek bahan bangunan, tegangan dukung, geser, dan lentur ditunjukkan pada tabel di atas dalam satuan lb/in^2 (psi). Untuk mempermudah pembaca, disertakan pula nilai modulus elastisitas, E.

Diskusi kita tentang sistem struktur dimulai dengan desain kayu, karena bahan ini digunakan pada struktur yang sangat kita kenal, yaitu rumah kita. Banyak dari kita telah mempunyai pengalaman dengan proyek konstruksi kayu dalam skala kecil, dan karenanya sangat wajar untuk memulai fokus kita pada analisis dan desain struktur dengan bahan yang kita kenal.

Elemen kayu biasanya mempunyai potongan melintang berbentuk persegi, yang paling mudah untuk dianalisis. Potongan baja sering berbentuk balok I sehingga sedikit lebih sulit untuk didesain, khususnya karena adanya kemungkinan terjadi tekuk. Seperti kayu, balok dan kolom beton bertulang biasanya berbentuk persegi, tetapi karena beton bertulang harus diperlakukan sebagai aksi komposit antara beton dan baja, analisisnya lebih rumit daripada kayu atau baja.

Contoh struktur dasar pada sisa buku ini merupakan penerapan yang paling umum dari ketiga bahan bangunan tersebut. Anda akan menyadari bahwa semua teori yang disajikan dalam bab-bab sebelumnya sangat berguna, dan semua yang kita diskusikan dapat diaplikasikan pada analisis dan desain struktur.

10.2 Balok Anak Kayu, Usuk, dan Stud

Mungkin elemen struktur kayu yang paling mudah dan paling umum adalah balok anak lantai, usuk (rafter) atap, dan *stud wall.* Balok anak, balok usuk serta kolom *stud wall* dibuat dari kayu yang sudah dipotong, termasuk papan, dengan lebar 2 – 4 in. dan tebal 2 – 14 in. Lebarnya yang paling umum adalah 2 in., sedangkan tebalnya bisa sampai 12 in. Semua ini adalah dimensi kayu kasar, yang biasanya masih dipotong dan dihaluskan (kadang-kadang disebut dikerjakan) ke dimensi sebenarnya, di mana

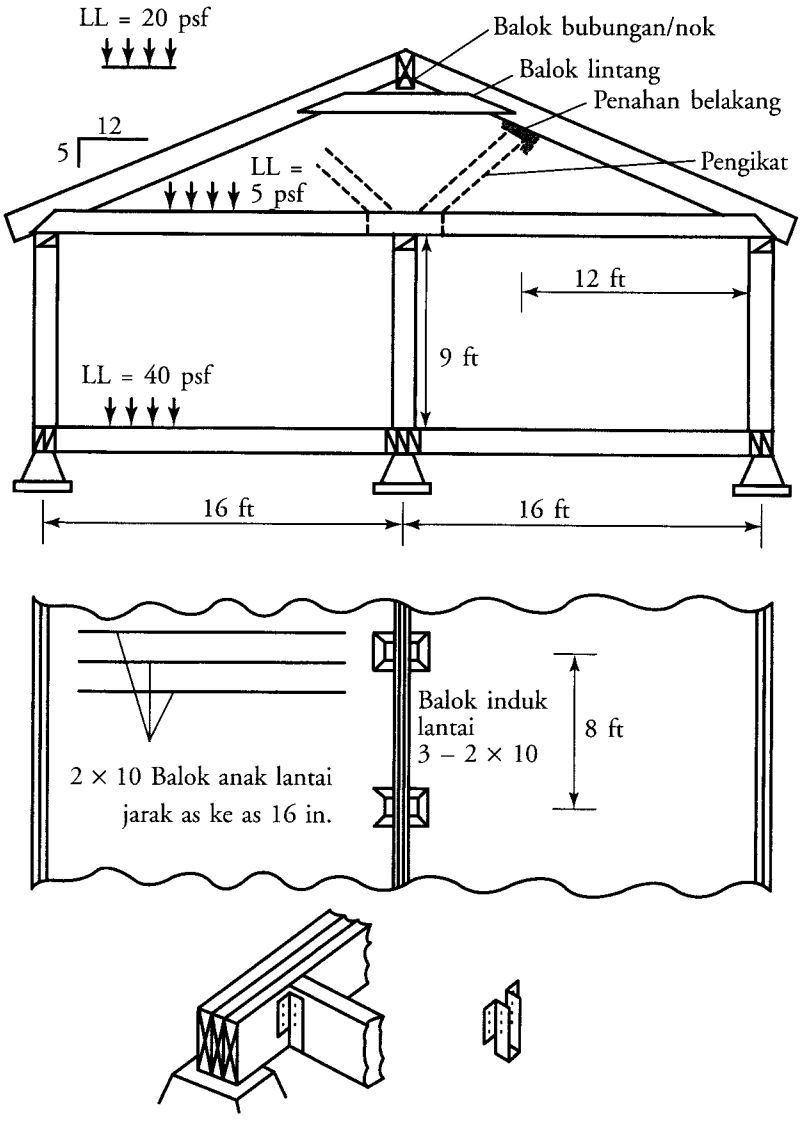
lebarnya berkurang $\frac{1}{2}$ in., tebal kayu 6 in. berkurang $\frac{3}{4}$ in., dan tebal kayu lebih dari 6 inci berkurang $\frac{1}{2}$ inci. Jadi, sebuah kayu berdimensi 2 × 6 menjadi 1,5 in. × 5,5 in., sedangkan kayu dengan dimensi 2 × 8 menyusut menjadi 1,5 in. × 7,25 in. Tabel di bawah memperlihatkan besaran penampang berdasarkan dimensi aktual di mana $A = bh$, $S = bh^2/6$, dan $Ibh^3/12$.

Secara individu, elemen-elemen struktur ini mempunyai kapasitas beban yang relatif rendah, tetapi ukuran yang kecil membuat tukang kayu dapat mengangkatnya tanpa membutuhkan peralatan pengangkat khusus. Dengan menempatkan elemen struktur pada jarak 12 in., 16 in., atau 24 in. satu sama lain, dapat dibuat bentang horisontal lantai dan atap sampai 20 ft (stud wall biasanya mempunyai tinggi 8 atau 9 ft). Sementara itu, elemen struktur untuk bentang yang lebih panjang atau dinding penahan beban berat dapat diletakkan dengan jarak as ke as 12 in., sedangkan jarak 24 in. sering digunakan untuk elemen penahan beban ringan. Kebanyakan balok anak kayu, usuk, dan stud berjarak 16 in. dari as ke as.

Kebanyakan bangunan tempat tinggal dibangun seluruhnya dari kayu. Struktur-struktur seperti ini jarang dihitung secara teknik, meskipun demikian peraturan bangunan setempat menyediakan standar konstruksi yang memberi pembangun suatu pengarahan untuk menyatukan praktik-praktik yang secara teknik aman. Kebutuhan akan analisis struktur biasanya hanya muncul untuk situasi yang tidak biasa seperti dinding tinggi penahan beban yang tidak biasa atau bentang besar yang tidak umum untuk ruang terbuka yang lebar. Peraturan bangunan biasanya menyediakan tabel balok anak dan bentang usuk yang merupakan kumpulan hasil-hasil analisis balok lentur untuk sederet kemungkinan beban dan bentang. Ketinggian dinding dan batas jarak stud untuk dinding penahan beban juga dinyatakan. Kita akan mengerjakan suatu contoh sederhana yang menunjukkan faktor-faktor yang mempengaruhi perkembangan pengawasan peraturan.

Pada Gambar 10.1 kita melihat suatu potongan melintang dari struktur rumah tinggal yang sederhana. Kita ingin membuktikan apakah balok anak lantai berdimensi 2 × 10, usuk atap berdimensi 2 × 6, dan stud wall penahan beban berdimensi 2 × 4 setinggi 9 ft sudah memadai untuk menahan beban-beban yang terjadi. (Kita akan memeriksa 3 balok induk lantai ukuran 2 × 10 pada contoh berikutnya). Kita asumsikan bahwa semua permukaan mempunyai beban mati 10 satuan psf. Beban hidup (LL) atap biasanya 20 psf (lebih besar untuk daerah dengan curah hujan salju tahunan yang tinggi), dan beban hidup lantai biasanya 40 psf untuk struktur rumah tinggal. Usuk atap dipaku ujung kakinya ke suatu balok bubungan/nok di puncak atap dan ujung satunya ke balok langit-langit, di mana ujung kaki balok langit-langit ini dipaku ke papan bidang

	$b \times h$	A in^2	S in^3	I in^4
2 × 4	1,5 × 3,5	5,25	3,06	5,4
2 × 6	1,5 × 5,5	8,25	7,56	20,8
2 × 8	1,5 × 7,25	10,9	13,1	47,6
2 × 10	1,5 × 9,25	13,9	21,4	98,9
2 × 12	1,5 × 11,25	16,9	31,6	178



GAMBAR 10.1

bagian atas dua dinding penahan bagian luar. Untuk mencegah angin mengangkat atap, disarankan untuk menggunakan sabuk ikat logam yang menghubungkan balok langit-langit ke bidang bagian atas dinding. Masing-masing ujung lain dua balok langit-langit tersebut disambung dengan cara saling ditumpangkan dan dipaku menumpang di atas dinding penahan bagian tengah.

Perhatikan bahwa balok lintang dekat puncak atap hanya digunakan pada setiap 3 pasang usuk (setiap 48 in.) dan tujuannya adalah untuk menguatkan sambungan ujung kaki usuk yang dipaku ke nok. Jika tidak, hubungan puncak atap dengan ujung kaki usuk mempunyai daya tahan yang kecil dan dapat dihancurkan oleh tekanan angkat ke atas dari angin atau usuk dengan beban yang berbeda. Perhatikan bahwa puncak yang dibentuk oleh 2 usuk cenderung untuk runtuh dan usuk cenderung untuk mendorong keluar dinding penahan terluar. Dorongan ini harus ditahan dengan suatu gaya tarik yang dapat dikerjakan di balok langit-langit, dengan memperhatikan bahwa balok ini saling menumpang dan dipaku pada ujung-ujung yang menumpang di atas dinding penahan bagian dalam.

Analisis usuk biasanya meliputi perlakuan terhadap usuk sebagai balok sederhana dengan bentang yang diproyeksikan secara horisontal sesuai dengan panjang jarak maksimum antara titik tempat pengikat berada. Beban hidup dan mati diasumsikan bekerja sepanjang proyeksi horisontal ini. Usuk biasanya diseleksi berdasarkan tegangan lentur ijinnya saja. Setiap kaki dari bentang horisontal usuk mempunyai lebar area pembebanan sebesar $\frac{16}{12}$ ft, sehingga beban per kaki adalah $w = (20 + 10)(\frac{16}{12}) = 40$ plf. Dalam kasus ini, tegangan lentur pada usuk adalah $f = M/S$

$$f = \frac{wL^2/8}{bh^2/6} = \frac{40 \times \frac{16^2}{8} \times 12}{7{,}56} = 2.030 \text{ psi}$$

Karena tegangan ini melampaui tegangan lentur yang diijinkan untuk kayu, yaitu 1.200 psi, yang telah disebutkan pada bagian sebelumnya. kita harus mencoba usuk berdimensi 2 × 8, atau kita dapat mengurangi bentang usuk.

Untuk mengurangi bentang, pertama-tama kita memaku suatu pengkaku, atau "*strongback*", terbuat dari 2 papan ukuran 2 × 4 sepanjang sisi bawah semua usuk. Kemudian, kita gunakan penopang 2 × 4 pada setiap usuk lainnya (jarak as ke as 32 in.) dan mengikatkan *strongback* ke dinding penahan bagian tengah seperti ditunjukkan oleh garis putus-putus pada gambar. Pengikat ini mengerjakan 2 hal: mereka mengurangi bentang horisontal dari 16 ft menjadi 12 ft, dan mengalihkan mayoritas

beban atap dari dinding terluar ke dinding penahan beban bagian tengah, yang sekarang menopang pusat dari atap 20 ft. Tegangan lentur pada usuk yang diikat sekarang adalah

$$f = \frac{40 \times 12^2/8 \times 12}{7{,}56} = 1.143 \text{ psi}$$

Jadi usuk pengikat 2 × 6 sudah memadai.

Balok anak lantai ukuran 2 × 10 diperiksa untuk tegangan lentur dan pelendutan maksimum, tidak boleh lebih dari $L/300$ = (16 × 12) / 300 = 0,6 in. Tegangan lenturnya adalah

$$f = \frac{(40 + 10)\left(\frac{16}{12}\right) \times \frac{16^2}{8} \times 12}{21{,}4} = 1.196 \text{ psi}$$

Jadi balok anak sudah memadai untuk tegangan lentur. Lendutan yang terjadi adalah

$$D = \frac{f \times L^2}{5 \times E \times h} = \frac{1.196 \times (16 \times 12)^2}{5 \times 1.600.000 \times 9{,}25} = 0{,}6 \text{ in.}$$

Batas lendutan yaitu $L/300$ tidak dilampaui, jadi balok anak ukuran 2 × 10 juga sudah memadai. Dalam banyak kasus, sering dijumpai bahwa ukuran balok anak yang dipilih sudah mempunyai tegangan lentur yang memadai, tetapi lendutannya tidak. Dalam kasus ini, balok anak cukup kuat, tetapi tidak cukup kaku untuk dapat dipakai, sehingga kayu yang lebih besar harus digunakan.

Dalam hubungannya dengan beban langit-langit, dinding di bagian tengah sekarang menopang beban atap yang disalurkan melalui pengikat 2 × 4. Meskipun jarang diperiksa sebagai kolom, pengikat ini adalah elemen tekan yang dapat langsung tertekuk 1,5 inci. Pusatkan perhatian pada stud 2 × 4 dari dinding penahan bagian tengah, stud diperlakukan sebagai kolom sederhana 9 ft. Lembaran besar *sheetrock* atau panel *plywood* yang menutup stud untuk menyelesaikan dinding *(finished walls)* dipaku ke stud dan mencegah mereka dari tekuk pada sekitar sumbu lemahnya sebesar 1,5 in. dari penampang melintangnya. Tetapi ada kemungkinan bahwa beban dapat membuat seluruh dinding tertekuk keluar karena stud menekuk 3,5 in. dari penampang melintangnya. Dalam kasus dinding 9 ft ini, rasio kerampingan kolom adalah L/h = (9 × 12)/3,5 = 31. Mengacu pada kurva tegangan kolom kayu untuk rasio eksentrisitas = 0,3 pada Bab 7, tegangan kolom yang diijinkan adalah f_{CR} = 420 psi.

Jadi, kapasitas masing-masing *stud* adalah $F_{IZIN} = f \times A$ = 420 × 5,25 = 2.200 lb. Karena stud berjarak 16 in. = 1,33 ft dari as ke as, beban

merata yang diijinkan per kaki dinding adalah w_{IZIN} = 2.200/1,33 = 1.660 plf. Beban yang bekerja pada dinding bagian tengah berjumlah setengah beban langit-langit ditambah beban mati dan hidup atap 20 ft, yaitu sebesar

$$w = [(20 + 10)(20) + (5 + 10)(16)] = 840 \text{ plf}$$

Karena $w < w_{IZIN}$, maka dinding penahan pun dinyatakan memadai. Untuk dinding yang lebih tinggi dan atau untuk dinding penahan yang menopang lantai atas, bisa digunakan stud 2 × 6.

Latihan Kerjakan kembali soal ini, buatlah lebar rumah 36 ft, alih-alih 32 ft. Pengikat dapat digunakan untuk mengurangi bentang usuk menjadi 14 ft. Periksa tekuk pada pengikat. Apakah balok langit-langit ukuran 2 × 6 memadai untuk batas lendutan L/300? (Asumsikan beban hidup sebesar 5 psf) ■

10.3 Tabel Balok Anak (Joist)

Para pembuat bangunan biasanya mengandalkan tabel-tabel untuk memilih dimensi kayu yang cocok untuk situasi khusus. Tabel balok anak dan bentang usuk dapat digunakan sebagai referensi untuk menentukan dimensi dengan cepat, pada elemen berjarak 12 in., 16 in., atau 24 in., dan berapa bentang yang diperlukan untuk dimensi 2 × 4, 2 × 6, 2 × 8, 2 × 10, atau 2 × 12. Baik tegangan lentur atau lendutan membatasi bentang yang diijinkan. Tabel-tabel seperti itu sering dibuat secara umum untuk pemeriksaan elemen yang dibuat dari jenis dan mutu kayu yang berbeda.

Kita akan membuat sebuah tabel bentang balok anak lantai untuk kasus khusus di mana tegangan lentur yang ada adalah f = 1.200 psi, dan modulus elastisitasnya E = 1.600.000 psi. Kita asumsikan beban mati sebesar 10 psf dan beban hidup sebesar 40 psf, sehingga jumlah beban seluruhnya adalah 50 psf. Jika kita menyatakan jarak as ke as antar elemen dalam satuan in. sebagai *cc*, maka beban per kaki pada suatu balok anak adalah $w = 50 \times cc/12 = 4{,}17\ cc$ plf. Kita akan membatasi besar lendutan sampai $\frac{1}{300}$ × panjang bentang, atau $L/300$.

Modulus penampang balok anak S dapat dihitung atau diambil langsung dari tabel yang diperlihatkan pada aplikasi soal sebelumnya. Dengan tegangan yang diijinkan, f = 1.200 psi, kita menghitung kapasitas momen sebuah balok anak sebesar $M = f \times S$, atau $M = 1.200\ S$ in-lb. Momen lentur yang harus ditahan balok anak adalah $M = wL^2/8$ ft-lb. atau $M = 1{,}5wL^2$ in-lb. Dengan w = 4,17 *cc* plf, kita menyamakan

kapasitas momen yang diijinkan dengan momen yang terjadi sehingga kita dapatkan rumus bentang yang diijinkan L dalam satuan kaki:

$$L = \sqrt{\frac{192 \times S}{cc}}$$

Untuk struktur ukuran 2 × 10 dengan $S = 21{,}4$ in^3, dan jarak balok anak 16 in., bentang yang diijinkan berdasarkan pada tegangan lentur dari rumus di atas adalah $\sqrt{(192 \times 21{,}4)/16} = 16{,}0$ ft.

Kita menurunkan suatu rumus untuk lendutan balok sederhana menurut momen lentur yang diijinkan dan kekakuan struktur, $D = ML^2/(10EI)$. Kita telah menentukan batas lendutan yang diijinkan sebesar $D = L/300$. Jika kita menyamakan lendutan yang diijinkan dan lendutan sebenarnya, kita dapatkan bahwa $L = EI/(30M)$. Jika kita mensubstitusi nilai $E = 1.600.000$ psi dan $M = 1{,}5(4{,}17\ cc)L^2 = 6{,}25\ (cc)\ L^2$ in-lb dan mengkonversikan bagian kanan ke dalam satuan kaki dengan membaginya dengan 12 in./ft, kita akan mendapatkan

$$L = \sqrt[3]{\frac{711 \times I}{cc}}$$

Untuk struktur 2 × 10 dengan $I = 98{,}9$ in^4 dan berjarak 16 in., bentang yang diijinkan berdasarkan batas lendutan adalah $L = 16{,}4$ ft.

Bentang ijin yang dilaporkan untuk balok anak tersebut pada jarak yang sudah ditentukan adalah kurang dari dua panjang bentang yang telah dihitung, sehingga bentang yang diijinkan untuk balok anak lantai ukuran 2 × 10 akan dilaporkan sebesar 16 ft pada tabel. Dengan menggunakan program *spreadsheet* dan dua rumus bentang yang diijinkan, tabel balok anak berikut ini dapat dibuat (nilai-nilai dibulatkan ke satuan kaki terdekat untuk memudahkan).

BENTANG MAKSIMUM BALOK ANAK LANTAI YANG DIIJINKAN (DALAM FT)

	Jarak Balok Anak		
	12 in.	**16 in.**	**24 in.**
2 × 4	7	6	5
2 × 6	11	10	8
2 × 8	14	13	10
2 × 10	18	16	13
2 × 12	22	20	16

(Dalam tabel ini, lendutan membatasi bentang balok yang diijinkan untuk jarak 12 inci, atau jika tidak, tegangan lentur yang membatasinya.)

Latihan Buatlah tabel bentang horisontal usuk bagi beban mati 10 psf dan beban hidup 20 psf yang diproyeksikan horisontal. Batas lendutan total adalah $L/240$. ■

10.4 Balok Induk Lantai

Kayu potongan dapat dibawa dan ditempatkan dengan mudah oleh tukang kayu, tetapi kenyamanan dari ukuran yang kecil ini juga berarti setiap elemen hanya dapat menopang luasan pembebanan yang kecil, sehingga banyak kayu yang harus ditempatkan sejajar untuk menutup seluruh luasan struktur atap, lantai, atau dinding. Pada Gambar 10.1, balok induk sederhana lantai dengan bentang 8 ft menopang suatu luasan pembebanan lantai sebesar 8 ft × 16 ft = 126 ft^2, seperti beban dari dinding penahan. Elemen ini dibuat dari 3 papan berukuran 2 × 10 yang dipaku bersama untuk membentuk sebuah penampang melintang 4,5 in × 9,25 in dengan luas $A = 3 \times 13{,}9 = 41{,}7$ in^2 dan modulus penampang $S = 3 \times 21{,}4 = 64{,}2$ in^3.

Jumlah total beban uniform sepanjang 8 ft bentang balok induk adalah jumlah beban hidup dan beban mati, berat dinding penahan, dan beban atap serta langit-langit di atas dinding penahan:

$$w = (40 + 10) \times 16 + 10 \times 9 + 840 = 1.730 \text{ plf}$$

Beban ini menyebabkan tegangan lentur sebesar

$$f = \frac{1.730 \times 8^2/8 \times 12}{64{,}2} = 2.590 \text{ psi}$$

Ini menunjukkan bahwa 3 papan ukuran 2 × 10 dengan bentang 8 ft tidak memadai untuk memenuhi batas tegangan lentur yang bekerja sebesar 1.200 psi. Kita harus mengurangi bentang balok induk dengan menggunakan lebih banyak tiang tumpuan pondasi, dan mungkin menggunakan balok induk yang lebih besar. Jika kita menggunakan tiga balok ukuran 2 × 12 ($A = 50{,}6$ in^2 dan $S = 94{,}8$ in^3) dan bentang 6 ft, tegangan lentur berkurang secara proporsional sampai

$$f = 2.590 \times \frac{64{,}2}{94{,}8} \times \frac{6^2}{8^2} = 990 \text{ psi}$$

Karena tegangan lentur ini tidak melebihi tegangan yang diijinkan sebesar 1.200 psi, kita akan memakai 3 balok lantai 2 × 12.

Lendutan jarang menjadi hal yang kritis untuk bentang kecil, dan dalam kasus ini batas lendutan adalah $L/300 = (6 \times 12)/300 = \frac{1}{4}$ in. dan lendutan aktual atau sebenarnya adalah

$$D = \frac{990 \times (6 \times 12)^2}{5 \times 1.600.000 \times 11{,}25} = 0{,}06 \text{ in.}$$

Tidak seperti balok dengan bentang panjang dan beban yang ringan, balok pendek dengan beban berat harus diperiksa terhadap geser dan tegangan dukung pada tumpuannya, di mana reaksi yang terjadi adalah setengah dari seluruh beban balok, $F = \frac{1}{2} \times (1.730 \times 6) = 5.190$ lb. Tegangan geser yang terjadi adalah

$$f_V = 1{,}5 \times \frac{F}{A} = 1{,}5 \times \frac{5.190}{50{,}6} = 154 \text{ psi}$$

dan asumsikan bagian atas tiang tumpuan adalah 6 in × 6 in, luas daerah yang bersinggungan dengan dua balok induk lantai yang didukungnya adalah $A = 4{,}5 \times 6 = 27$ in^2, dan tegangan dukungnya adalah

$$f = \frac{2 \times F}{A} = \frac{2 \times 5.190}{27} = 384 \text{ psi}$$

Kita lihat tegangan dukung yang terjadi di bawah batas tegangan kerja yang diijinkan sebesar 500 psi, tetapi tegangan geser melebihi tegangan yang diijinkan, yaitu 90 psi, lebih besar sekitar 70%, sehingga dibutuhkan 5 papan ukuran 2 × 12 untuk memenuhi luasan geser yang dibutuhkan. Ini tidak realistis.

Jika kita mencoba balok kayu solid, yang biasanya mempunyai tegangan yang diijinkan sama dengan kayu potongan, diperlukan potongan melintang yang lebih besar daripada 3 balok ukuran 2 × 12 yang tidak memadai tersebut. Balok kayu solid mempunyai ukuran nominal yang secara umum lebih besar 5 in. untuk lebar dan tebal lebih dari 8 in. Kurangi $\frac{1}{2}$ in. dari lebar dan tebal nominalnya untuk menentukan dimensi sebenarnya. Karena tegangan geser yang diijinkan masih 90 psi, maka jika kita memakai kayu solid dengan lebar 6 in., luas penampang melintang yang dibutuhkan adalah

$$A = \frac{1{,}5 \times 5.190}{90} = 87 \text{ in}^2$$

Dan tebal balok yang dibutuhkan menjadi $h = 87/5{,}5 = 15{,}7$ in. Dengan menerima sedikit kelebihan tegangan geser, sebuah balok kayu solid ukuran 6 × 16 memenuhi batas semua tegangan kritis. Meskipun demikian, kayu seperti ini mahal, dan cenderung digunakan pada tempat-tempat di mana kayu sejenis itu layak dipakai dan memerlukan nilai estetika.

Kita harus memikirkan kembali desain balok induk lantai bagian tengah. Kita dapat memindahkan beban atap kembali ke dinding terluar dengan menggunakan rangka batang prafabrikasi. Kita dapat menambah balok induk lantai dan mengurangi bentang balok anak lantai. Kita juga

dapat mengurangi bentang balok induk lantai secara bersamaan dengan mengganti tiang tumpuan yang bekerja secara individu dengan sebuah tapak lajur beton menerus, di mana dalam kasus ini balok anak lantai akan ditumpangkan dan dipaku ke sebuah bidang kayu yang diikatkan ke bagian atas dinding tapak. Penutup antara balok anak akan dibutuhkan untuk menjaganya dari puntir.

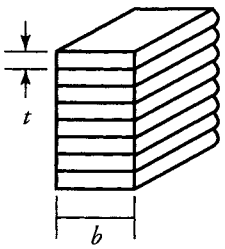
Jika tidak mungkin memakai tapak menerus, balok baja sering digunakan sebagai balok lantai—suatu praktik yang umum pada penggunaan *basement.* Kita masih harus mempertimbangkan alternatif kayu yang lain untuk perencanaan lantai, balok glulam, yang akan kita bicarakan pada aplikasi berikutnya.

Latihan Tentukan apakah 3 balok induk lantai 2 × 12 dengan tiang tumpuan berjarak 6 ft cukup untuk balok lantai tepi jika rangka batang atap dengan bentang 32 ft yang berjarak 24 in. dari as ke as menyalurkan beban atap ke dua dinding penahan terluar. Asumsikan bahwa jumlah beban mati ditambah beban hidup dan beban langit-langit yang diproyeksikan secara horisontal adalah 35 psf. Tentukan juga jumlah papan ukuran 2 × 12 yang diperlukan untuk balok lantai bagian tengah jika dinding bagian tengah tidak menerima beban atap apapun. ■

10.5 Balok Bubungan/Nok Glulam

Balok kayu glulam mempunyai keunggulan dalam hal dapat menahan beban berat dengan bentang yang besar, dan balok ini masih bisa dilekatkan dengan mudah terhadap elemen kayu lain dengan menggunakan paku dan baut sederhana. Balok kayu glulam tidak umum digunakan untuk balok lantai dengan bentang yang pendek seperti pada aplikasi soal sebelumnya, meskipun balok dapat digunakan untuk itu. Pada beberapa bangunan rumah tinggal dan komersial, penggunaan balok glulam yang bermutu dan mahal menghasilkan penampilan yang estetik, seperti kayu solid. Karena penampilan balok glulam tidak begitu penting, pabrik biasanya membuat glulam dengan penyelesaian yang kasar sehingga harganya lebih murah.

Tidak seperti balok kayu solid yang diambil dari pohon-pohon yang besar, balok glulam dibuat di pabrik. Balok glulam dibuat dari beberapa kayu potongan dengan tebal nominal 1 in. atau 2 in. yang dilaminasi dan ditempelkan bersama seperti yang terlihat pada Gambar 10.2. Ketebalan laminasi sebenarnya adalah 1,5 in., kecuali pada elemen yang dilengkungkan secara ekstrim diperlukan papan lentur yang lebih tipis yaitu $\frac{3}{4}$ in.



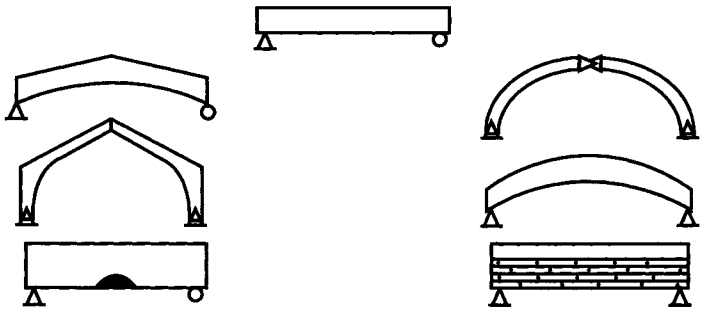
Ketebalan laminasi

$t = 1\frac{1}{2}$ in. untuk sebagian besar elemen glulam

$t = \frac{3}{4}$ in. untuk elemen yang dilengkungkan dengan tajam

Lebar laminasi

$b = 3\frac{1}{8}, 5\frac{1}{8}, 6\frac{3}{4}, 8\frac{3}{4}, 10\frac{3}{4}$ in.



Cacat alami setempat yang besar pada balok kayu solid

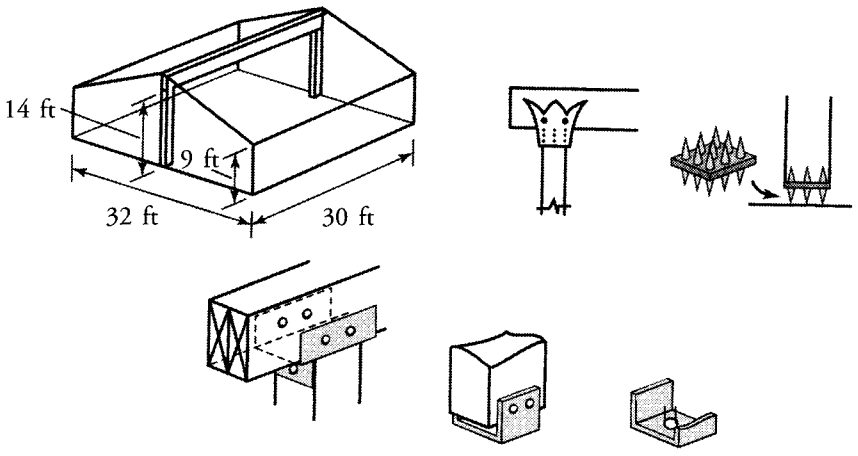
Cacat yang tersebar pada balok laminasi

GAMBAR 10.2

Ketebalan potongan melintang glulam adalah jumlah laminasi dikalikan ketebalan papan. Lebar penampang melintang glulam yang diperlihatkan pada gambar sudah dikurangi sedikit dari ketebalan kayu laminasi yang sebenarnya. Hal ini disebabkan karena sisi elemen glulam yang difabrikasi direncanakan akan mempunyai permukaan yang halus.

Dibandingkan dengan umur dan ukuran pohon yang diperlukan untuk memproduksi elemen kayu solid yang besar, potongan kayu untuk balok laminasi diperoleh dari pohon kecil yang cepat tumbuh yang dapat ditanam dan ditebang dalam waktu yang singkat. Laminasi yang kecil mempunyai fleksibilitas yang besar dalam menghasilkan elemen glulam yang dapat dibuat dalam berbagai bentuk dan ukuran, seperti yang diperlihatkan. Tegangan lentur dan geser glulam yang diijinkan sedikitnya 50% lebih tinggi dari kayu solid karena cacat yang dapat mengurangi tegangan pada glulam tidak sebanyak cacat pada kayu solid, dan cacat-cacat ini bahkan disebarkan sepanjang elemen seperti yang diperlihatkan. Juga, kayu laminasi bermutu tinggi dapat digunakan pada elemen yang tegangannya kritis, sehingga tegangan lentur balok laminasi yang diijinkan adalah 1.800 psi, dan tegangan geser yang diijinkan adalah 150 psi, dibandingkan dengan tegangan kayu solid, yaitu 1.200 psi dan 90 psi.

Pada Gambar 10.3, kita lihat suatu bagian sayap dari sebuah rumah dengan atap katedral yang terbuka. glulam mutu tinggi dengan permukaan yang diekspos akan digunakan sebagai balok bubungan/nok yang diekspos,



GAMBAR 10.3

dengan ujung-ujungnya ditopang oleh tiang kayu ukuran 6 × 6. Tentukan jumlah nominal laminasi 2 in. yang diperlukan untuk balok glulam dengan lebar nominal 6 in. (lebar sebenarnya = 5,125 in.). Untuk mencegah retak pada penyelesaian langit-langit yang terbuat dari *Sheetrock*, batasi lendutan hingga $L/300$. Asumsikan beban hidup dan mati atap yang diproyeksikan secara horisontal sebesar 20 psf dan 10 psf.

Lebar daerah pembebanan beban horisontal atap adalah 16 ft, sehingga, beban uniform balok adalah 16 × (20 + 10) = 480 plf. Asumsikan berat balok glulam adalah sekitar 20 plf, dan didesain untuk w = 500 plf. Momen lentur yang terjadi adalah

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{500(30)^2}{8} \times 12 \text{ in./ft} = 675.000 \text{ in-lb}$$

Modulus penampang yang diperlukan adalah $S = M/f_{IZIN}$ = 675.000/1.800 = 375 in^3. Karena $S = bh^2/6$ dan b = 5,125 in, kita memperoleh ketebalan balok yang diperlukan sebesar

$$h = \sqrt{\frac{6 \times 375}{5{,}125}} = 21 \text{ in.}$$

Jadi dengan tebal nominal potongan kayu sebesar 2 in., kita akan membutuhkan 21/1,5 = 14 laminasi. Dengan mengasumsikan kerapatan kayu sebesar 40 lb/ft^3, kita mendapatkan berat balok sebesar (5,125 × 21)/144 × 40 = 28 plf, yang melampaui perkiraan yang kita yakini sebesar 20 plf, tetapi kita dapat mengatakan perbedaan sebesar 8 plf ini dapat diabaikan.

Reaksi tumpuannya sama dengan $F = wL/2 = 500 \times 15 = 7.500$ lb
Tegangan geser maksimumnya adalah

$$f_V = 1{,}5 \times \frac{F}{A} = 1{,}5 \times \frac{7.500}{5{,}125 \times 21} = 105 \text{ psi}$$

Tegangan geser ini sudah berada di bawah tegangan yang diijinkan sebesar 150 psi. Luas daerah kontak antara glulam dan kolom pendukungnya adalah $A = 5{,}125 \times 5{,}5 = 28{,}2 \text{ in}^2$, dan tegangan dukung yang terjadi adalah

$$f = \frac{F}{A} = \frac{7.500}{28{,}2} = 266 \text{ psi}$$

Tegangan dukung ini masih di bawah batas tegangan yang diijinkan yaitu 500 psi. Terakhir, kita memeriksa lendutan balok dengan tegangan penuh yang mempunyai lendutan yang diijinkan $L/300 = \frac{360}{300} = 1{,}2$ in.

$$D = \frac{1.800 \times (30 \times 12)^2}{5 \times 1.600.000 \times 21} = 1{,}4 \text{ in.}$$

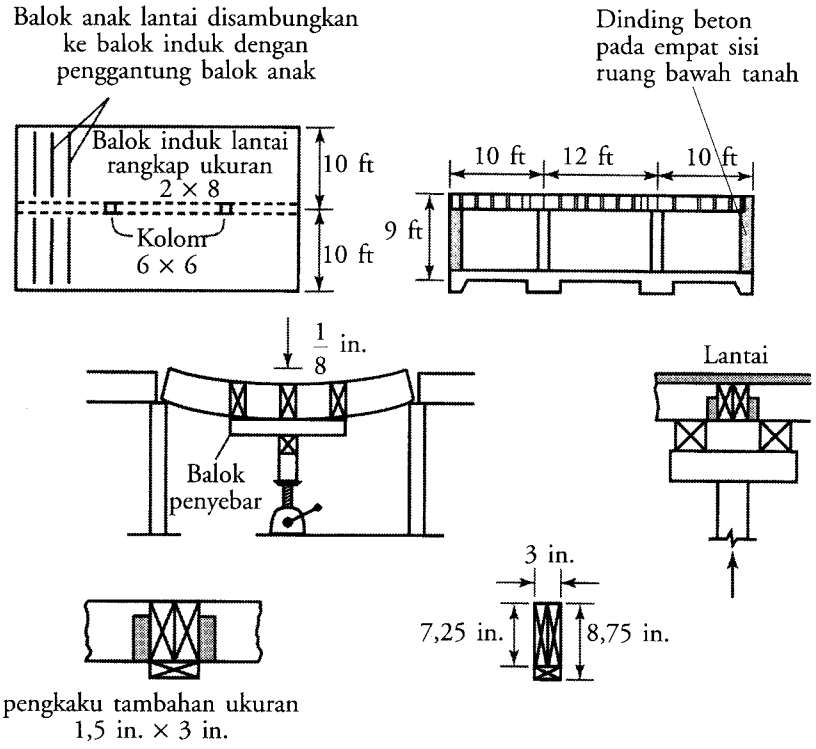
Kita ternyata mempunyai sedikit masalah kekakuan. Untuk memenuhi batas 1,2 in., kita membutuhkan balok yang sedikit lebih tebal. Jika kita menambahkan sebuah laminasi, ketebalan yang baru menjadi 22,5 in. dan modulus penampang menjadi $5{,}125(22{,}5)^2/6 = 432 \text{ in}^3$, dan tegangan lentur menjadi 675.000/432 = 1.560 psi. Lendutan balok yang lebih kaku ini sekarang berkurang ke batas yang dapat diterima sebesar

$$D = \frac{1.560 \times (30 \times 12)^2}{5 \times 1.600.000 \times 22{,}5} = 1{,}1 \text{ in.}$$

Latihan Kerjakan lagi soal ini dengan mengasumsikan bahwa balok bubungan nok mempunyai bentang 24 ft ■

10.6 Balok Induk Lantai dengan Pengkaku

Seorang ayah dan anaknya bekerja sama pada suatu musim panas untuk membangun sebuah rumah berlibur. Lokasi rumah kecil itu, termasuk ruang bawah tanahnya, berada pada daerah terpencil sehingga mereka dapat melakukan pembangunan tanpa IMB, pemeriksaan perencanaan, atau pemeriksaan bangunan setiap beberapa waktu tertentu, dari pemerintah setempat. Setelah menyelesaikan sistem lantai seperti yang terlihat pada Gambar 10.4, mereka menyadari bahwa lantai tersebut terlalu fleksibel. Dengan berjalan di sepanjang dua balok induk lantai



GAMBAR 10.4

ukuran 2 × 8, mereka dapat melihat perbedaan kekakuan lantai ketika berjalan dari ujung bentang 10 ft ke tengah bentang 12 ft. Mereka membicarakan hal ini dengan tetangganya yang bekerja sebagai tukang kayu profesional dan tukang kayu itu menyarankan untuk menggunakan dua balok ukuran 2 × 10 sebagai pengganti balok ukuran 2 × 8.

Sang anak ingat bahwa ia pernah melihat acara perbaikan rumah di televisi, di mana balok ruang bawah tanah yang sudah tua dan melentur didongkrak naik dan sebuah pengkaku ditambahkan pada balok induk lantai tersebut. Sang ayah memutuskan bahwa hal tersebut layak dicoba sebelum melakukan langkah ekstrim mengganti bagian tengah lantai tersebut. Gambar kedua memperlihatkan pengkaku sebar kotak ukuran 4 × 4 dapat menyatukan tiga balok anak lantai yang dihubungkan kedua sisinya dengan balok induk lantai rangkap, dan tiang 4 × 4 akan memudahkan mereka menggunakan dongkrak mobil untuk mengangkat balok.

Karena balok anak lantai ukuran 2 × 8 berukuran sama dengan balok induk lantai, penggantung balok anak yang menghubungkannya dengan balok induk lantai sedikit menonjol keluar di sisi bawah papan rangkap 2 × 8. Untuk alasan ini, pengkaku yang akan mereka tempelkan ke dasar balok induk lantai dipotong menjadi ukuran 2 × 4, dengan

dimensi aktual 1,5 in. × 3 in. Lendutan dari bentang 12 ft diukur sebesar $\frac{1}{8}$ in., sehingga dengan dongkrak yang sudah pada tempatnya, balok induk lantai diangkat ke atas $\frac{1}{8}$ in., dan pengkaku dilekatkan serta dipaku sepanjang bentang 12 ft. Setelah beberapa saat, dongkrak dipindahkan dan sistem pengkaku lantai yang dihasilkan tampak memadai sehingga ayah dan anak itu merasa lega dan sang tukang kayu pun memutuskan bahwa mereka tidak perlu mengganti dan mengerjakan ulang lantainya.

Kita akan menentukan tegangan desain serta lendutan sebelum dan sesudah situasi ini. Beban mati balok anak lantai dan *plywood* lantai setebal $\frac{3}{4}$ in dengan karpetnya adalah 5 psf, dan kita akan mengerjakan beban hidup ringan sebesar 20 psf untuk situasi ini. Jadi beban yang didistribusikan dari balok anak lantai berbentang 10 ft adalah $w = (5 + 20) \times 10 = 250$ plf. Tegangan lentur untuk balok induk rangkap ukuran 2 × 8 adalah $f = M/S$.

$$f = \frac{wL^2/8}{S} = \frac{250 \times \frac{12^2}{8}\,12}{2 \times 13{,}1} = \frac{54.000}{26{,}2} = 2.060 \text{ psi}$$

Modulus penampang balok pengkaku adalah $S = bh^2/6 = 3 \times 8{,}75^2/6 = 38{,}3 \text{ in}^3$, dan tegangan lenturnya adalah $f = 54.000/38{,}3 = 1.410$ psi. Karena tegangan ini melebihi tegangan lentur kayu yang diijinkan sebesar 1.200 psi, dan merupakan suatu perbaikan besar jika dibandingkan dengan tegangan 2.060 psi, maka masuk akal bagi kita untuk memperbolehkan terjadinya kelebihan tegangan pada rumah liburan ini.

Lendutan balok berbanding lurus dengan momen inersia. Untuk dua balok persegi dengan lebar penampang melintang yang sama, rasio lendutan relatif keduanya disederhanakan sebagai rasio pangkat tiga dari tinggi penampang melintangnya. Dalam kasus ini, momen inersia balok pengkaku adalah $(8{,}75/7{,}25)^3 = 1{,}76$ dikalikan kekakuan dua balok 2 × 8. Lendutan desain untuk balok pengkaku ini adalah

$$D = \frac{1.410 \times (12 \times 12)^2}{5 \times 1.600.000 \times 8{,}75} = 0{,}4 \text{ in.}$$

Batas lendutan yang diijinkan $L/300$ adalah 0,48 in., sehingga lendutan balok pengkaku dapat diterima.

Latihan

Berapakah pertambahan kekakuan yang dihasilkan jika suatu plat baja ukuran $\frac{1}{4}$ in. × 3 in. dibaut ke balok induk lantai rangkap ukuran 2 × 8 sebagai pengganti plat kayu ukuran 1,5 in. × 3 in.? Hal ini menghasilkan elemen komposit kayu/baja yang dikenal sebagai *flitch beam*. Gunakan rasio modular efektif, $E_S/E_W = 24$. ■

10.7 KOLOM

Tentukan apakah kolom kayu 6 × 6 setinggi 14 ft yang menopang balok bubungan/nok dengan bentang 30 ft sudah memadai. Asumsikan bahwa salah satu ujung atap katedral terbuka merupakan dinding kaca, jadi kolom sama sekali tidak memiliki penahan terhadap tekuk. Kolom pada ujung lainnya dilekatkan dan diikat oleh tembok pada ujung ruangan tersebut.

Dengan menggunakan kurva kolom seperti yang diperlihatkan pada Bab 7, kita memeriksa kolom terhadap beban normalnya dengan lebih mudah. Untuk kasus kolom penopang balok bubungan/nok ini, kita dapatkan bahwa reaksi tumpuan dari balok dengan bentang 30 ft yang menerima beban merata sebesar 500 plf adalah $F = 500 \times \frac{30}{2} = 7.500$ lb. Dari kurva kolom untuk tiang 6 × 6 tanpa pengikat dengan panjang 14 ft, beban yang diijinkan adalah $F = 14.000$ lb. Jadi, kolom lebih dari cukup untuk menopang beban tersebut.

Ingat bahwa diperlukan peralatan khusus untuk membuat hubungan balok-kolom yang besar. Beberapa peralatan memang mudah didapat, seperti bidang penopang yang diperlihatkan pada Gambar 10.3, tetapi untuk hal-hal khusus, seperti modifikasi tampilan untuk membuat agar struktur terlihat antik, kita memerlukan detail hubungan yang membutuhkan keahlian khusus. Juga, ketika kolom dilekatkan ke pondasi beton, disarankan agar kayu dihindarkan dari kontak langsung dengan beton untuk mencegah agar kayu tidak membusuk karena kelembaban yang diserap serat-serat kayu pada ujung potongannya. Peralatan standar untuk mengatasi hal ini juga diperlihatkan pada gambar.

Latihan Tentukan apakah tiang kayu 4 × 4 cukup kuat untuk kolom setinggi 9 ft yang menopang balok induk lantai pada Gambar 10.4 ■

10.8 BAUT DAN PAKU

Penyambung yang paling umum pada struktur kayu adalah paku, sekrup kayu kecil, *lag bolt* (sekrup kayu besar dengan kepala berbentuk baut), dan baut. Paku mempunyai kekuatan yang hampir sama dengan sekrup kayu, sementara lag bolts mempunyai kekuatan yang sama dengan baut geser. Paku biasanya digunakan untuk menghubungkan kayu potongan, dan baut digunakan untuk sambungan kayu yang lebih besar, atau jika suatu hubungan memerlukan banyak paku untuk menyalurkan beban

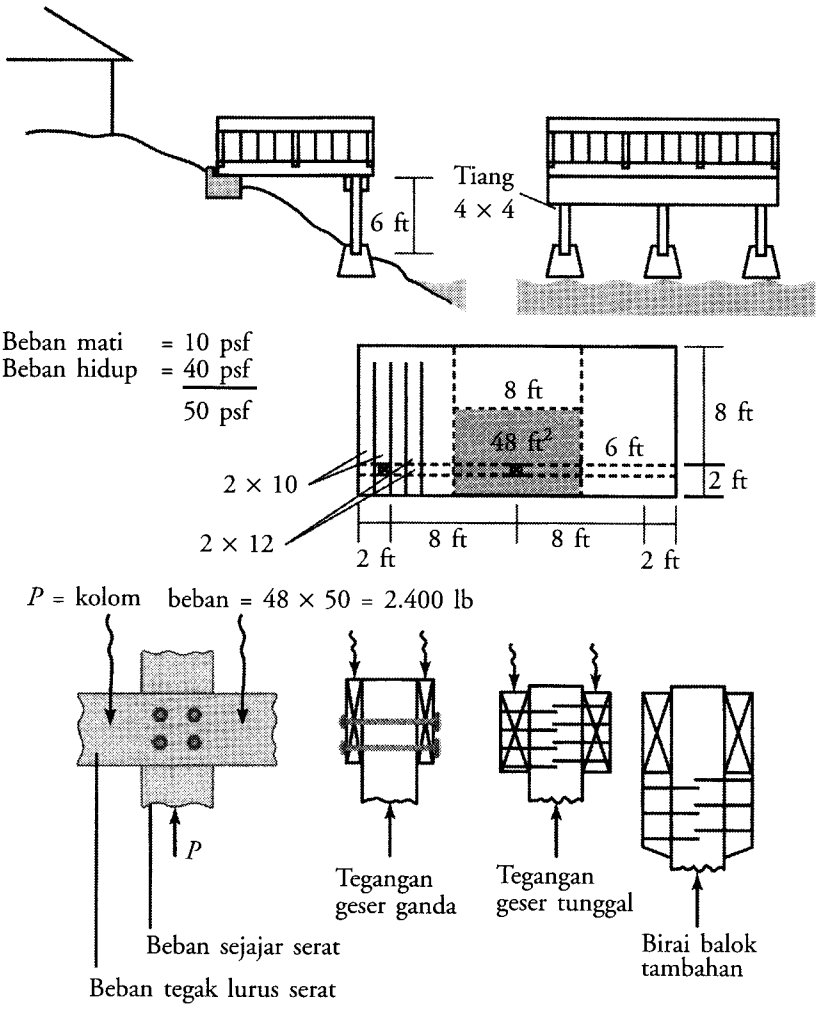
terpusat yang besar. Pada Gambar 10.5, kita harus menyalurkan beban lantai sebesar 2.400 lb dari sepasang balok ukuran 2 × 12 ke kolom ukuran 4 × 4.

Paku tersedia dalam berbagai ukuran diameter dan panjang. Paku yang paling sering digunakan untuk menyambung papan potongan adalah paku 16d, 20d, 30d, dan 40d (d di sini berarti berat paku sebesar 1,55 gram).Penggunaan struktural paku yang lebih kecil dari 1,55 gram, seperti ukuran 6d sampai 12d, adalah untuk menyambung lembaran *plywood* pada sebuah sekat, atau untuk menyambungkan elemen logam tipis ke kayu. Paku digunakan untuk menyalurkan beban-beban lateral pada sebuah sambungan geser antar elemen seperti diperlihatkan pada gambar. Sambungan yang bergantung pada kekuatan pencabutan paku harus dihindari. Paku yang lebih panjang dengan diameter yang lebih besar mempunyai kapasitas beban lateral yang lebih tinggi daripada paku yang lebih kecil.

Ketika digunakan untuk menyambung sebuah papan dengan ukuran nominal 2 in. (tebal 1,5 in.) ke beberapa elemen kayu lainnya, paku yang sering digunakan adalah paku $3\frac{1}{2}$ in. 16d, 4-in. 20d, dan 5-in. 40d yang masing-masing mempunyai kapasitas beban lateral 140 lb, 170 lb, dan 200 lb. Dengan mengasumsikan tiap elemen ukuran 2 × 12 menyalurkan setengah beban lantai ke tiang 4 × 4, diperlukan $(\frac{1}{2} \times 2.400)/170 =$ paku 20d untuk menyambungkan masing-masing balok ke tiang.

Ketika kita membicarakan sambungan pada buku ini sebelumnya, kita mencatat banyak pemeriksaan tegangan yang harus dilakukan pada sambungan baut yang detail. Pemeriksaan ini meliputi tegangan dukung terhadap elemen yang disambung, tegangan geser tunggal atau rangkap pada baut, baut yang keluar karena geseran antar elemen yang dihubungkan, tegangan penampang kotor dibandingkan dengan tegangan penampang bersih dari elemen-elemen tersebut, dan tegangan terpusat di sekitar lubang. Selain pada pemeriksaan tegangan, pertimbangan yang cermat harus dicurahkan untuk masalah pendetailan yang khusus. Sebagai contoh, ketika plat baja digunakan pada sambungan kayu, penyusutan alami kayu karena perubahan kadar kelembaban dapat menyebabkan kayu memisah sepanjang seratnya, dan sementara itu tidak terjadi perubahan apa pun pada elemen baja yang disambungkan ke kayu dengan baut tegar.

Kita tidak akan masuk ke pembicaraan yang lebih jauh tentang detail sambungan, tugas ini lebih baik diserahkan ke perancang struktur yang sudah berpengalaman dan para pembuatnya di pabrik. Kita hanya berharap mempunyai gambaran kasar berapa jumlah baut yang diperlukan pada suatu sambungan, dan apakah tersedia ruang yang cukup untuk meletakkan baut-baut tersebut dengan jarak satu sama lain yang memadai. Ketika menjelaskan tentang sambungan kayu yang menggunakan baut, kita harus



GAMBAR 10.5

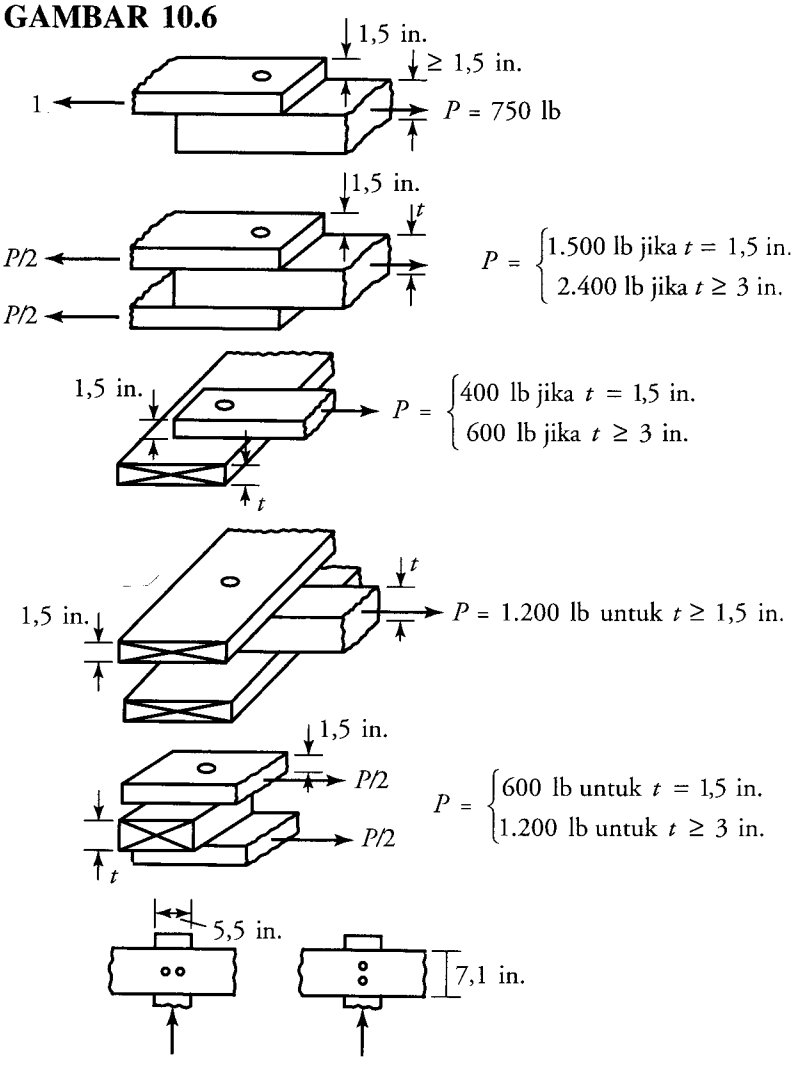
melihat ketebalan elemen yang disambungkan; kita harus membedakan antara tegangan geser tunggal atau rangkap; dan kita harus menentukan apakah elemen dibebani secara paralel atau secara tegak lurus terhadap seratnya.

Diameter baut yang umum digunakan pada kayu berkisar antara $\frac{1}{2}$ in. sampai 1 in., dengan baut $\frac{3}{4}$ in. yang sangat berguna untuk menggantikan 2 sampai 18 paku. Kita hanya akan memusatkan perhatian pada sambungan yang dibuat untuk papan dengan ukuran nominal 2 in, atau antara papan 2 in. dan elemen kayu yang lebih besar. Gambar 10.6 memperlihatkan perkiraan kapasitas beban untuk baut $\frac{3}{4}$ in. yang digunakan pada berbagai variasi sambungan. Kapasitas ini berkisar dari

400 lb untuk tegangan geser tunggal pada sambungan antara elemen setebal 1,5 in. dengan suatu elemen yang dibebani tegak lurus seratnya, sampai 2.400 lb untuk tegangan geser rangkap dengan semua elemen dibebani sejajar serat dan elemen utama mempunyai ketebalan yang sama dengan kedua elemen di sampingnya. Gambar itu juga memperlihatkan bahwa dua baut sebaris yang berjajar tegak lurus serat elemennya memerlukan lebar aktual elemen setidaknya 5,5 in. jika dibebani sejajar serat. Demikian juga, dua baut sebaris pada elemen yang dibebani tegak lurus serat akan memerlukan lebar aktual minimum sebesar 7 in.

Sambungan pada Gambar 10.5 mempunyai beban sambungan sebesar 2.400 lb. Dari Gambar 10.6, beban yang diijinkan per baut $\frac{3}{4}$ in. pada sambungan antara kolom 3,5 in. dan elemen samping 1,5 in. yang dibebani tegak lurus serat adalah 1.200 lb. Jadi, kita akan memerlukan 2.400

GAMBAR 10.6



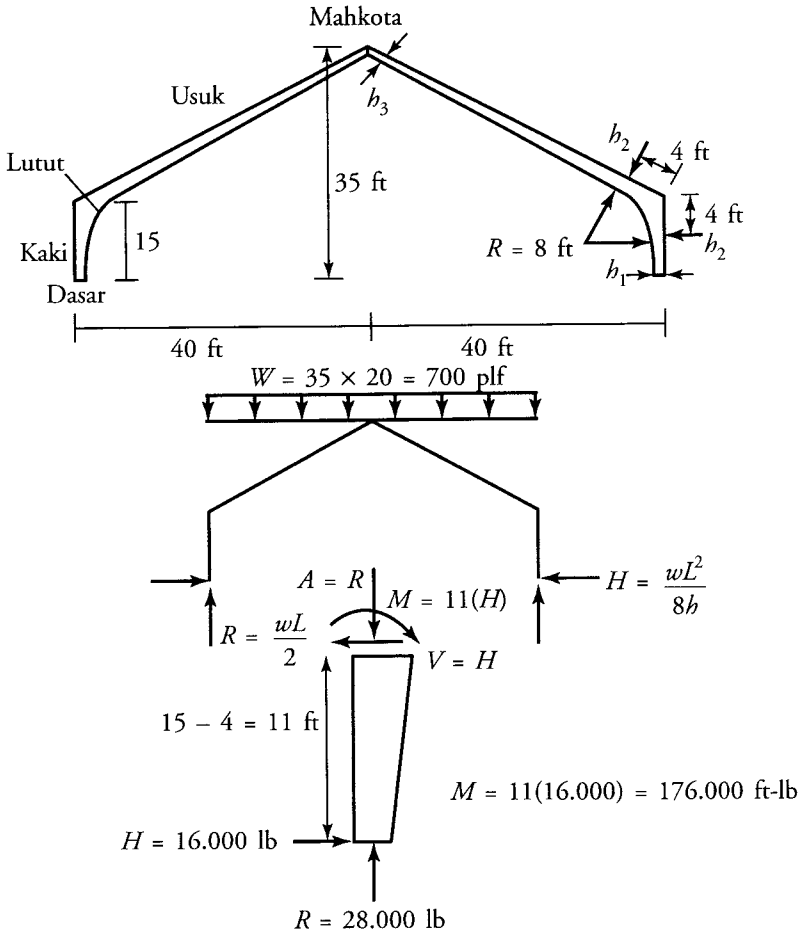
1.200 = 2 baut, yang akan ditempatkan pada satu baris secara vertikal. Jika kita memerlukan dua baris yang masing-masing baris terdiri dari dua baut–4 baut seluruhnya–pada sambungan seperti terlihat pada Gambar 10.5, kita akan memerlukan tiang yang lebih lebar (setidaknya pada bagian atas di mana sambungan dibuat). Dalam kasus ini, kita akan menggunakan tiang 6 × 6 sebagai pengganti tiang 4 × 4, sedangkan balok ukuran 2 × 12 sudah cukup lebar untuk dua baut sebaris.

Latihan Kerjakan lagi soal ini dengan mengasumsikan bahwa tiang 4 × 4 diletakkan berjarak 10 ft jauhnya. Anggaplah sambungan baut atau sambungan paku antara birai balok 2 × 4 dan tiang 4 × 4 (lihat gambar) akan menerima sebagian beban tambahan dari lantai yang lebih besar. Periksalah kelayakan kolom 4 × 4 setinggi 6 ft dengan menggunakan kurva kolom kayu. ■

10.9 Busur Tudor Glulam

Kita akan mengerjakan desain awal dari elemen struktur seperti yang diperlihatkan pada Gambar 10.7, yang merupakan aplikasi umum dari elemen glulam yang runcing dan melengkung yang membentuk portal 3 sendi dalam bentuk *gable* yang dikenal sebagai busur Tudor. Elemen struktur kayu yang indah ini sering terlihat pada gereja, sekolah, dan banyak fasilitas publik lainnya. Bentuk elemen glulam seperti ini bervariasi, dengan banyak kombinasi keruncingan dan kelengkungan.Bahkan bentuk busur Tudor sangat bervariasi, dengan bentang lebih dari 100 ft, kaki panjang dengan kemiringan usuk yang relatif rendah, kaki panjang dengan bentuk kemiringan gable yang tinggi, bentuk setengah busur yang simetris dan tidak simetris, dan masih banyak lagi. Seperti yang sudah kita nyatakan sebelumnya, glulam dengan lengkungan yang tajam menggunakan papan dengan ukuran nominal 1 in, untuk menghasilkan laminasi setebal $\frac{3}{4}$ in., daripada papan dengan tebal nominal 2 in. yang digunakan untuk elemen lurus atau sedikit melengkung.

Busur Tudor kerap kali menopang langsung papan dek yang terbuat dari papan berlidah dan bercelah *(tongue-and-groove boards)* dengan tebal 3–4 in. yang membentang tranversal terhadap kemiringan atap dari busur ke busur dan menyalurkan beban merata vertikal dari beban mati dan hidup atap. Selain itu, busur dapat menopang dek atap 2 in. yang memanjang searah kemiringan atap, membentang sepanjang gording glulam sekunder yang berjarak beberapa kaki jauhnya dan gording ini sendiri membentang antara busur untuk menyalurkan beban terpusat dari atap sepanjang usuk busur. Dengan kata lain, beban mati dan beban



GAMBAR 10.7

hidup atap diasumsikan terdistribusi merata dalam proyeksi horisontal pada pemeriksaan desain awal seperti ini. Jika busur berjarak 20 ft dan beban mati serta beban hidup atap adalah 35 psf, beban atap yang didistribusikan, w, adalah 20 ft × 35 lb/ft^2 = 700 plf seperti yang diperlihatkan.

Karena dua bagian setengah busur tersebut disambung dengan *pin*, atau sendi, pada mahkota dan dasar masing-masing kakinya, struktur tersebut merupakan suatu portal tentu dengan tiga persamaan kesetimbangan dari masing-masing setengah busur untuk menghitung 6 komponen reaksi yang tidak diketahui, dua reaksi pada masing-masing *pin*. Meskipun demikian, kita dapat melakukan suatu analisis portal dengan pertama-tama mengetahui bahwa untuk struktur simetris dengan beban merata seperti ini, reaksi vertikal yang dihasilkan sebesar

$$R = \frac{wL}{2} = \frac{700(80)}{2} = 28.000 \text{ lb}$$

Kemudian dari rumus reaksi horisontal busur, kita dapatkan

$$H = \frac{wL^2}{8s} = \frac{700(80)^2}{8 \times 35} = 16.000 \text{ ft-lb}$$

Sebelumnya kita sudah menggunakan rumus di atas pada busur lingkaran dengan beban merata, tetapi rumus tersebut juga dapat digunakan dengan hasil perkiraan yang sangat baik untuk busur dua sendi dan tiga sendi dengan beban merata. Tidak seperti busur ideal yang seluruhnya mengalami tekanan murni, busur Tudor tidak berbentuk ideal seperti parabola yang mengikuti diagram momen lentur dari balok sederhana. Akibatnya, busur Tudor harus menahan kerja gabungan dari gaya normal tekan maupun lentur.

Untuk busur simetris, lebar dua elemen busur, b, biasanya ditentukan dengan metode coba-coba, yang diambil dari beberapa pilihan yaitu 3,125; 5,125; 6,75; 8,75; dan 10,75 in. Untuk ukuran awal busur, dengan mengacu pada gambar di mana kita dapat melihat tinggi potongan melintang usuk pada mahkota, h_3, sebesar 1,5 dikalikan lebar elemen. Tinggi potongan melintang kaki pada bagian dasar, h_1, ditentukan berdasarkan tegangan geser karena gaya horisontal, H.

Bagian lutut busur menghubungkan ujung bagian usuk dan kaki salah satu dari dua elemen busur. Potongan melintang pada kedua ujung elemen ini mempunyai tinggi yang sama, h_2. Letak potongan melintang ini biasanya diperkirakan pada jarak 4 ft dari perpotongan permukaan luar usuk dan kaki, baik ke arah usuk maupun ke arah kaki. Letak sebenarnya tergantung dari tinggi akhir potongan melintang, h_2, dan jari-jari bagian dalam lutut, yang mempunyai garis singgung pada kemiringan usuk bagian dalam dan muka kaki dan biasanya berkisar dari 7 sampai 10 ft.

Jika kita mencoba b = 6,75 in. untuk lebar elemen busur, tinggi elemen pada mahkota dapat dipastikan sebesar

$$h_3 = 1{,}5 \times 6{,}75 \approx 10 \text{ in.}$$

Tinggi penampang melintang yang diperlukan pada bagian dasar ditentukan dengan membatasi tegangan geser dasar, $f_V = 3V/2A$, dengan tegangan geser yang diijinkan sebesar 150 psi. Di sini, $V = H$ = 16.000 lb, dan $A = 6{,}75 \times h_1$, sehingga

$$h_1 = \frac{3(16.000)}{2 \times 6{,}75 \times 150} \approx 24 \text{ in.}$$

Kita lihat dari diagram benda bebas (free-body diagram) bahwa kaki busur bagian bawah pada gambar bahwa itu adalah sebuah balok-kolom yang menerima lentur dan normal tekan. Kita akan mengasumsikan

dinding struktur terluar mengikat kaki terhadap tekuk sebesar 6,75 in. Momen lentur pada pertemuan dengan bagian lutut adalah $M = (15 - 4)(16.000) = 176.000$ ft-lb, dan gaya tekan aksial adalah $R = 28.000$ lb. Kita harus memilih ukuran penampang melintang yang memenuhi persamaan interaksi balok-kolom

$$\frac{F}{F_{\text{IZIN}}} + \frac{M}{M_{\text{IZIN}}} \leq 1$$

Jika kita mengasumsikan momen lentur mengambil bagian terbesar dari kapasitas total elemen, maka untuk tegangan lentur yang diijinkan sebesar 1.800 psi, modulus penampang yang diperlukan adalah

$$S_{\text{YANG DIIBUTUHKAN}} = \frac{M}{f_{\text{IZIN}}} + \frac{176.000 \times 12}{1.800} = 1.170 \text{ in}^3$$

Karena $S = bh^2/6$, ketebalan elemen yang diperlukan berdasarkan momen saja adalah

$$h = \sqrt{\frac{6 \times 1.170}{6{,}75}} \approx 32 \text{ in.}$$

Kita dapat mencoba nilai yang sedikit lebih besar, misalnya $h = 36$ in, kemudian memeriksa rumus interaksi. Tegangan tekan aksial yang diijinkan untuk kolom pendek yang diikat adalah 1.000 psi, sehingga $F_{\text{IZIN}} = f_{\text{IZIN}} \times bh = 1.000\ (6{,}75 \times 36) = 243.000$ lb. Kita mendapatkan juga momen yang diijinkan menjadi $M_{\text{IZIN}} = f_{\text{IZIN}} \times S = 1.800 \times 6{,}75\ (36^2)/6 \times \frac{1}{12} = 219.000$ ft-lb. Persamaan interaksi menjadi

$$\frac{28.000}{243.000} + \frac{176.000}{219.000} = 0{,}12 + 0{,}80 = 0{,}92$$

Karena rasio yang diperoleh kurang dari 1, maka balok kolom tersebut dapat diterima, dan kita dapat mengasumsikan bahwa

$$h_3 \approx 36 \text{ in.}$$

Jika kaki bagian bawah busur setinggi 11 ft tidak diikat oleh dinding terluar, bagian kaki menjadi elemen tekan yang tidak terikat dengan kerampingan kolom sebesar $L/h = (11 \times 12)/6{,}75 = 20$. Dari kurva tegangan kolom kayu pada Bab 7, $L/h = 20$ memberikan tegangan tekan aksial yang diijinkan sebesar $f_{\text{IZIN}} = 730$ psi, atau 73% dari kolom yang diikat. Pengurangan yang sama harus diterapkan pada tegangan lentur yang diijinkan, karena momen juga menyebabkan tegangan lentur tekan yang menambah kecenderungan elemen untuk menekuk sebesar 6,75 in. Jadi, hasil persamaan interaksi bertambah menjadi 0,92/0,73 = 1,26. Ini berarti bahwa ada kelebihan tegangan sebesar 26% pada daerah kritis di pertemuan lutut-kaki.

Untuk mengurangi tambahan tegangan karena efek kerampingan, kita dapat menggunakan elemen yang lebih lebar, misalnya b = 8,75 in. Hal ini menambah luasan dan modulus penampang sebesar 8,75/6,75 = 1,3 atau 30% dan pada saat yang bersamaan, kerampingan yang baru, L/h = (11 × 12) / 8,75 = 15, menghasilkan tegangan tekan yang diijinkan sebesar 890 psi, atau 89 % dari kolom yang diikat. Persamaan interaksi sekarang menjadi 0,92/(1,3 × 0,89) = 0,80, yang sekali lagi kurang dari 1 (dengan sedikit ruang untuk mengurangi sedikit tinggi penampang melintang kritis).

Harus diingat bahwa kita hanya mengerjakan desain percobaan yang harus diteliti lebih jauh untuk berbagai variasi beban, termasuk beban ke atas karena angin. Geser dan gabungan tekan aksial dan lentur pada usuk juga harus diperiksa. Tetapi, biasanya, prosedur desain awal busur Tudor seperti yang diperlihatkan di sini akan menghasilkan ukuran elemen yang memenuhi pemeriksaan tegangan lainnya.

Latihan

Kerjakan lagi soal ini untuk bentang busur 60 ft alih-alih 80 ft. Asumsikan ketinggian kaki dan mahkota adalah sama. Pertama asumsikan bahwa dinding mengikat kaki dari kemungkinan tekuk, kemudian asumsikan juga bahwa bagian bawah kaki busur setinggi 11 ft tidak diikat oleh dinding terluar. ■

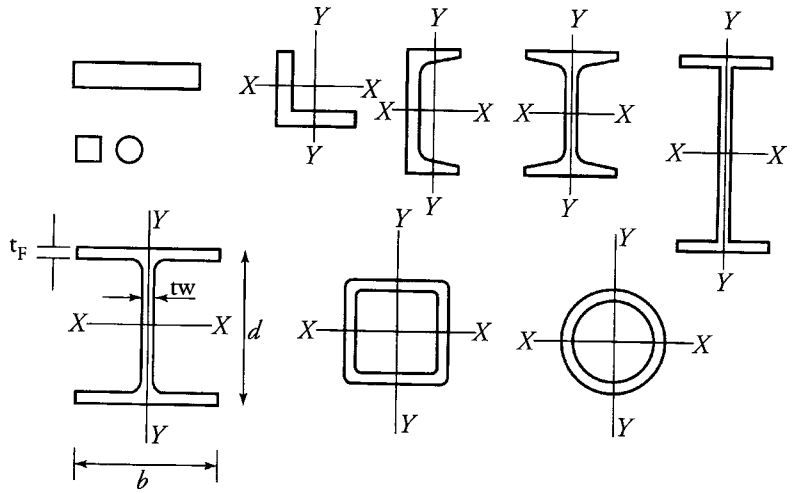
11 PENERAPAN PADA DESAIN STRUKTUR BAJA

11.1 BENTUK STRUKTURAL

Kerampingan struktur-struktur besar yang terbuat dari baja memberi kontribusi yang elegan dan dramatis pada lansekap arsitektur dunia. Jembatan dengan bentang yang panjang dan indah, pencakar langit yang tinggi dan ramping, ruang rapat publik yang terbuka dan beraliran udara, dan banyak lagi pekerjaan konstruksi lainnya adalah beberapa dari sekian banyak struktur estetik yang dibuat dari baja.

Baja adalah suatu bahan yang sangat kuat, yang diproduksi dengan batas elastis (tegangan leleh) yang berkisar dari tegangan yang umum sebesar 36.000 psi sampai untaian kawat baja mutu tinggi yang dapat menahan tegangan tarik sebesar 270.000 psi. Karena baja adalah material yang padat dengan berat satuan sekitar 500 pcf, jika dibandingkan dengan kayu dan beton, beton mempunyai rasio tegangan per satuan berat yang jauh lebih besar sehingga dapat digunakan untuk bentang-bentang yang panjang dengan struktur yang relatif ringan. Rasio tegangan terhadap berat yang besar ini membuat elemen baja dapat difabrikasi dengan penampang melintang yang tipis, seperti terlihat pada Gambar 11.1.

Kita lihat pada gambar bahwa pada kilang pembentuk baja, baja dipanaskan dengan torak pembentuk untuk dijadikan elemen-elemen padat dengan berbagai variasi bentuk dan ukuran. Sebaliknya, bentuk-bentuk yang bervariasi ini dapat digunakan untuk membuat elemen struktur dengan bentuk tak terbatas. Plat baja, batang-batang persegi dan bundar, penyiku, bentuk C, balok I standar, balok I dengan sayap lebar, pipa persegi berongga, dan pipa bundar berongga adalah bentuk-bentuk penampang melintang baja yang umumnya tersedia. Masing-masing bentuk dasar ini tersedia dalam berbagai variasi ukuran penampang melintang, dan informasi yang lengkap tentang semua penampang baja ini dapat ditemukan pada edisi terbaru Manual Konstruksi Baja *(Manual of Steel Construction)* yang diterbitkan oleh Institut Konstruksi Baja Amerika *(American Institute of Steel Construction).*



Balok	d	t_w	b	t_F	A	A_w	I_X	S_X	r_X	I_Y	S_Y	r_Y
W6×12	6,03	0,23	4	0,28	3,5	1,4	21,7	7,2	2,5	3,0	1,5	0,9
W8×18	8,14	0,23	5,25	0,33	5,2	1,9	60,9	15,0	3,4	8,0	3,0	1,2
W10×33	9,73	0,29	7,96	0,44	9,6	2,8	168,0	34,5	4,2	37,0	9,3	2,0
W12×40	11,9	0,3	8	0,52	11,6	3,6	303,8	50,9	5,1	44,4	11,1	2,0
W14×30	13,8	0,27	6,73	0,39	8,8	3,7	287,6	41,6	5,7	19,8	5,9	1,5
W16×26	15,7	0,25	5,5	0,35	7,6	3,9	296,7	37,8	6,2	9,7	3,5	1,1
W16×100	17	0,59	10,4	0,99	29,4	10,0	1.481,9	174,6	7,1	185,9	35,7	2,5
W18×40	17,9	0,32	6,01	0,53	11,8	5,7	608,0	67,9	7,2	19,2	6,4	1,3
W18×97	18,6	0,54	11,2	0,87	28,5	10,0	1.739,5	187,1	7,8	201,2	36,1	2,7
W21×50	20,8	0,38	6,53	0,54	14,6	7,9	970,0	93,1	8,2	25,2	7,7	1,3
W21×122	21,7	0,6	12,4	0,96	35,6	13,0	2.940,8	271,3	9,1	304,7	49,2	2,9
W24×76	23,9	0,44	8,99	0,68	22,2	10,5	2.072,3	173,3	9,7	82,5	18,4	1,9
W24×131	24,5	0,61	12,9	0,96	38,5	14,9	4.000,3	326,8	10,2	340,7	53,0	3,0
W24×450	29,1	1,81	14	3,27	132,1	52,7	17.027,4	1.107,7	11,4	1.493,8	214,0	3,4
W27×94	26,9	0,49	10	0,75	27,5	13,2	3.239,7	240,7	10,9	125,2	25,0	2,1
W27×161	27,6	0,66	14	1,08	47	18,2	6.225,5	455	11,5	494,5	70,8	3,2
W27×235	28,7	0,91	14,2	1,61	68,8	26,1	9.616,6	671,1	11,8	768,3	108,3	3,3
W30×108	29,8	0,55	11,5	0,76	32,9	16,3	4.717,8	316,3	12,0	192,0	33,5	2,4
W30×191	30,7	0,71	15	1,19	55,9	21,8	9.127,7	595,0	12,8	675,6	89,8	3,5
W33×118	32,9	0,55	11,5	0,74	34,2	18,1	5.799,3	353,0	13,0	187,0	32,6	2,3
W33×318	35,2	1,04	16	1,9	93,3	36,61	9.480,6	1.108,1	14,4	1.296,2	162,1	3,7
W36×150	35,9	0,63	12	0,94	43,8	22,4	8.905,4	496,8	14,3	270,1	45,1	2,5
W36×300	36,7	0,95	16,7	1,68	87,7	34,9	20.159,6	1.097,4	15,2	1.297,1	155,7	3,8
W40×244	39,1	0,71	17,7	1,26	70,6	27,7	18.834,5	964,4	16,3	1.167,6	131,9	4,1
W40×436	41,3	1,34	16,2	2,4	126,9	55,4	35.035,4	1.695,0	16,6	1.720,6	211,9	3,7
W44×285	44	1,02	11,8	1,77	83,3	45,1	24.328,4	1.105,3	17,1	489,5	82,9	2,4

Kolom	d	t_W	b	t_F	A	A_W	I_X	S_X	r_X	I_Y	S_Y	r_Y
W5×19	5,2	0,27	5	0,43	5,5	1,4	26,4	10,1	2,2	9,0	3,6	1,3
W6×25	6,4	0,32	6	0,46	7,3	2,0	53,2	16,6	2,7	16,6	5,5	1,5
W8×40	8,3	0,36	8,1	0,56	11,7	3,0	147,2	35,5	3,6	49,6	12,3	2,1
W8×58	8,75	0,51	8,2	0,81	16,9	4,5	225,5	51,5	3,7	74,5	18,2	2,1
W10×60	10,2	0,42	10,1	0,68	17,4	4,3	335,9	65,9	4,4	116,8	23,1	2,6
W10×100	11,1	0,68	10,3	1,1	28,7	7,5	608,7	109,7	4,6	200,6	38,9	2,6
W12×87	12,5	0,51	12,1	0,81	25,2	6,4	729,4	116,4	5,4	239,3	39,6	3,1
W12×120	13,1	0,71	12,3	1,11	35,0	9,3	1.060,4	161,9	5,5	344,6	56,0	3,1
W14×120	14,5	0,59	14,7	0,94	35,1	8,6	1.371,2	189,1	6,3	497,9	67,7	3,8
W14×159	15	0,75	15,6	1,2	46,9	11,3	1.912,0	254,9	6,4	759,7	97,4	4,0
W14×428	18,7	1,88	16,7	3,04	125,1	35,0	6.591,2	706,1	7,3	2.366,7	283,4	4,3
W14×730	22,4	3,07	17,9	4,91	214,4	68,8	14.330,6	1.278,4	8,2	4.715,9	527,2	4,7

GAMBAR 11.1

Secara umum, plat yang dirol tersedia dalam ukuran lebar sampai 108 in. dan tebal sampai 3 in. Batang persegi dan bundar tersedia dalam ukuran sampai 9 inci. Penyiku, dengan ukuran kaki yang sama maupun yang tidak sama, tersedia dalam berbagai ukuran ketebalan, antara L2 × 2 × $\frac{1}{8}$ sampai L8 × 8 × 1$\frac{1}{8}$, di mana ketiga angka yang mengikuti tanda penyiku L ini menunjukkan lebar tiap kaki dan ketebalan penyiku dalam satuan in. Dengan membengkokkan plat datar menjadi bentuk persegi dan lingkaran, terbentuklah penampang pipa persegi dan pipa bundar berongga. Diameter pipa bundar berongga berkisar antara 1 in. sampai 12 in. dan ketebalan dindingnya berkisar dari 0,133 in. sampai 0,675 in. Pipa persegi berongga mempunyai penampang persegi berukuran 2 × 2 × $\frac{1}{4}$ sampai 16 × 16 × $\frac{1}{2}$ dan ukuran 3 × 2 × $\frac{1}{4}$ sampai 20 × 12 × $\frac{1}{2}$.

Bentuk C dan balok I standar mempunyai karakteristik tebal badan dan sayap yang sama, tetapi balok I sedikit lebih sempit dan ramping. Balok I standar atau penampang, S, tersedia dalam ukuran antara S3 × 7,5 sampai S24 × 121, di mana angka pertama pada tanda penampang menunjukkan tebal penampang dalam satuan inci, dan angka kedua menunjukkan beratnya dalam satuan pon per kaki untuk elemen dengan penampang melintang khusus. Hal yang sama berlaku untuk bentuk C, di mana ukuran penampang berkisar antara C3 × 4,1 sampai C15 × 50.

Dari berbagai penampang melintang elemen baja yang tersedia, penampang bentuk I dengan sayap lebar yang biasanya disebut penampang W adalah penampang yang paling sering digunakan, baik untuk balok maupun kolom. Karena ada lebih dari 100 penampang dengan lebar sayap yang berbeda, perancang struktur mempunyai fleksibilitas yang tinggi dalam memilih penampang yang akan digunakan untuk elemen-elemen struktur. Lebar flens b_F dan ketebalannya t_F, tinggi penampang d, dan ketebalan badan t_W, diberikan untuk beberapa penampang W yang umum digunakan untuk balok dan kolom pada empat kolom pertama dari tabel di Gambar 11.1.

Dengan menggunakan program *spreadsheet* sederhana dan rumus-rumus di bawah ini, empat ukuran yang diberikan tadi digunakan untuk menghitung perkiraan nilai dari luas penampang A, luas badan A_W, momen inersia I, modulus penampang S, jari-jari girasi r, baik untuk sumbu X-X maupun Y-Y. Nilai-nilai ini adalah pembulatan ke nilai terdekat karena potongan pada empat sudut bagian badan diabaikan. Berdasarkan definisi besaran penampang yang sudah diperlihatkan sebelumnya dalam buku ini, pembaca dapat dengan mudah mengenali rumus-rumus berikut ini

$$A = 2b_F t_F + t_W(d - 2t_F)$$

$$A_W = dt_W$$

$$I_X = \frac{b_F d^3}{12} - \frac{(b_F - t_W)(d - 2t_F)^3}{12}$$

$$S_X = \frac{2I_X}{d}$$

$$r_X = \sqrt{\frac{I_X}{A}}$$

$$I_Y = \frac{2t_F b_F^3}{12} + \frac{(d - 2t_F)(t_W)^3}{12}$$

$$S_Y = \frac{2I_Y}{b_F}$$

$$r_Y = \sqrt{\frac{I_Y}{A}}$$

Sebagai contoh, jika kita memilih penampang W8 × 40, yang mempunyai dimensi b_F = 8,07 inci, t_F = 0,560 in., d = 8,25 in., dan t_W = 0,360 in., kita dapat menghitung nilai-nilai pada tabel seperti berikut:

$$A = 2(8{,}07)(0{,}560) + (0{,}360)[8{,}25 - 2(0{,}56)] = 11{,}6 \text{ in.}^2$$

$$A_W = 8{,}25(0{,}360) = 2{,}97 \text{ in}^2$$

$$I_X = \frac{8{,}07(8{,}25^3)}{12} - \frac{(8{,}07 - 0{,}036)[8{,}25 - 2(0{,}560)]^3}{12} = 145 \text{ in}^4$$

$$S_X = \frac{2(145)}{8{,}25} = 35{,}2 \text{ in}^3$$

$$r_X = \sqrt{\frac{145}{11{,}6}} = 3{,}54 \text{ in.}$$

$$I_Y = \frac{2(0{,}560)(8{,}07^3)}{12} + \frac{[8{,}25 - 2(0{,}560)](0{,}360^3)}{12} = 49{,}1 \text{ in}^4$$

$$S_Y = \frac{2(49{,}1)}{8{,}07} = 12{,}2 \text{ in.}^3$$

$$r_Y = \sqrt{\frac{49{,}1}{11{,}6}} = 2{,}06 \text{ in.}$$

Penampang W mempunyai bentuk yang optimal untuk digunakan sebagai balok penahan lentur pada sumbu kuat *X-X*, tetapi relatif lemah pada sumbu *Y-Y*. Hal ini dapat dilihat pada tabel besaran penampang di mana besaran penampang pada sumbu kuat *X-X* lebih besar daripada sumbu lemah *Y-Y*. Perbedaan pada sumbu kuat dan lemah ini lebih terlihat pada penampang dengan rasio lebar flens terhadap tinggi penampang yang kecil, dan ini mengakibatkan diperlukannya pengikat lateral pada balok. Tekuk lateral pada balok adalah hal yang perlu diperhatikan pada

struktur baja, di mana sayap tekan panjang yang tidak terikat lebih sering dijumpai, dan karena kekakuan lateral sumbu *Y-Y* pada penampang W lebih kecil dari sumbu kuat *X-X*.

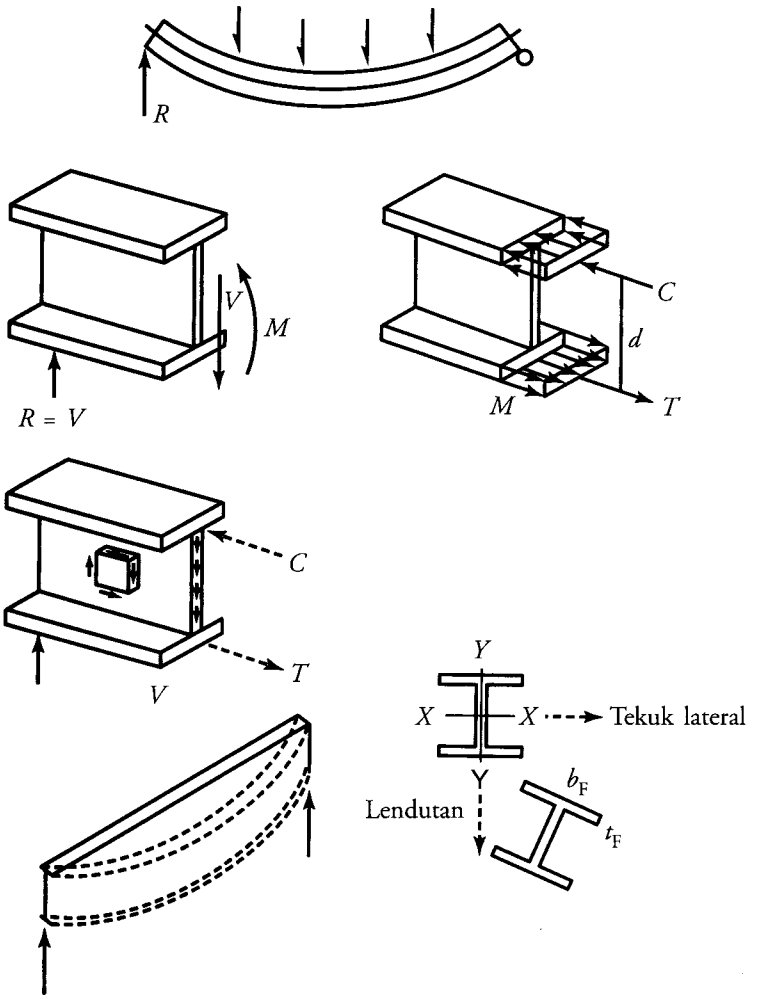
Penampang W juga sering digunakan sebagai elemen tekan, tetapi bentuk-bentuk tertutup seperti pipa persegi berongga dan pipa bundar berongga adalah bentuk penampang yang paling efisien untuk kolom karena penampang melintang seperti itu mempunyai rasio kerampingan yang sama pada sumbu *X-X* dan *Y-Y*. Untuk mempunyai efisiensi yang sama seperti yang dimiliki penampang melintang tertutup, penampang W yang biasa digunakan sebagai kolom dipilih dari penampang dengan bagian sayap (*flens*) dan badan (*webs*) yang tebal dengan lebar sayap dan tinggi penampangnya yang hampir sama. Hasilnya, besaran penampang pada sumbu kuat dan sumbu lemah mempunyai nilai yang hampir sama, sehingga kolom tidak akan tertekuk pada sumbu lemahnya pada tegangan tekan yang rendah.

Secara umum, sebagai elemen yang panjang, yang penampang melintangnya terbuat dari elemen yang tipis dan harus menerima tegangan yang tinggi, elemen baja cenderung lebih ramping daripada kayu dan beton, dan ukuran elemen baja yang diperlukan lebih ditentukan oleh batas tegangan tekan yang mengakibatkan terjadinya tekuk. Di samping itu, penampang melintang elemen plat baja kadang-kadang begitu tipis sehingga pada tegangan tekan setempat yang tinggi diperlukan tambahan plat pengkaku untuk mencegah tekuk pada plat baja yang tipis tersebut.

Latihan Penampang melintang bentuk I dibuat dari 3 plat yang dilas bersama, sebagai elemen *built-up* atau balok utama plat. Masing-masing plat sayap berukuran 16 in. × 1,5 in. dan plat badan berukuran 60 in. × 0,5 in. Tentukan besaran penampang dari penampang melintang ini. Ulangi soal latihan ini jika sayap bagian atas berukuran 12 in. × 0,75 in. Untuk kasus ini, rumus-rumus yang ada harus dimodifikasi karena titik beratnya tidak berada di tengah bagian badan (Rumus momen inersia yang digunakan untuk penampang persegi pada sumbunya dengan lebar dasar persegi b dan tinggi h adalah $I = bh^3/3$.) ■

11.2 Balok Anak Rangka Batang Terbuka dan Dek Lantai Balok Rol

Ketika digunakan sebagai balok, penampang W kerapkali dianggap sebagai balok rol yang mengacu pada suatu bagian konstruksi sebagai hasil proses *pengerolan* dalam kilang baja bila dibandingkan dengan balok bentuk I



GAMBAR 11.2

yang dibentuk dengan mengelas plat badan dan sayap yang terpisah. Pada Gambar 11.2, kita lihat sebuah penampang W yang digunakan sebagai balok sederhana. Sebagian besar luas penampang W pada sayap yang berjarak paling jauh dari sumbu sentroidal *X-X* di bagian tengahnya menerima tegangan lentur, $f = M/S_X$, yang paling besar. Bagian sayap menahan semua tegangan lentur dan mereka membentuk momen kopel yang diakibatkan oleh gaya tekan pada sayap bagian atas *C* dan gaya tarik pada sayap bagian bawah *T*.

Ketinggian bagian badan ditambah setengah tebal sayap menjadi lengan momen kopel karena bagian badan memisahkan dua gaya yang sama dan berlawanan arah tersebut. Kita lihat pada proses penyambungan kedua sayap, bagian badan mengalami geser, dan kita sudah menyatakan

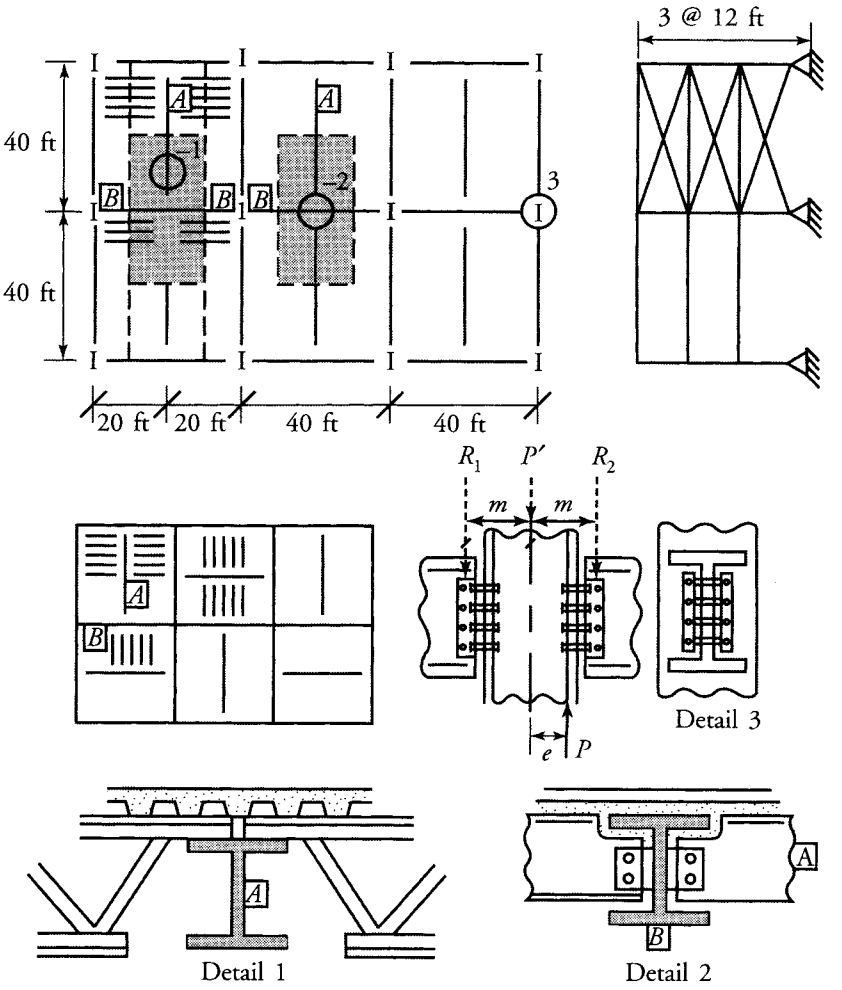
besar tegangan lentur geser horisontal dan vertikal adalah sama, yaitu $f_V = V/A_W$. Tegangan geser yang diijinkan adalah f_V = 14.000 psi.

Lentur pada sumbu *X-X* penampang W menyebabkan lendutan vertikal balok seperti yang ditunjukkan pada gambar. Kita biasanya mengasosiasikan perubahan bentuk ini sebagai balok yang melendut dan kita biasanya membatasi lendutan ini pada suatu fraksi bentang balok, misalnya $L/300$. Kita sudah memperlihatkan sebelumnya bahwa lendutan balok sederhana adalah $D = fL^2 / (5Eh)$.

Seperti yang kita lihat pada gambar, sayap tekan yang tidak diikat pada arah lateral membuat balok mempunyai kesempatan untuk mengalirkan bebannya sehingga sayap tekan bagian atas menekuk pada arah lateral. Tekuk ke arah lateral pada sumbu *Y-Y* penampang W ini dapat terjadi secara tiba-tiba pada sebuah sayap bagian atas yang ramping yang berlaku seperti kolom horisontal, dan tegangan lentur yang diijinkan pada sayap harus dikurangi untuk mencegah terjadinya tekuk ini. Untuk meminimalkan pengurangan tegangan lentur yang diijinkan karena sayap tekan yang tidak diikat ini, kita mencoba untuk menggunakan penampang W dengan sayap tekan yang lebar. Untungnya, balok biasanya diikat pada arah lateral dengan mengelas atau membautkan atap terbuka yang paling dekat atau balok anak lantai ke sayap balok penopang, atau dengan menggunakan penyambung geser *(shear connectors)* yang mengikat sayap tekan balok ke dek beton yang ditopangnya. Dengan mengikat sayap tekan balok pada arah lateral, tegangan lentur yang diijinkan adalah f = 24.000 psi.

Pada Gambar 11.3, kita lihat suatu tampak rencana portal yang digunakan sebagai dek atap dan lantai pada bangunan kantor tiga lantai. Tampak alternatif yang mungkin juga diperlihatkan untuk digunakan sebagai latihan berikutnya. Sambungan geser sederhana digunakan untuk menghubungkan balok utama ke balok utama dan balok utama ke kolom. Seperti yang terlihat pada sketsa Detail 1, dek dibuat dengan menuangkan 2 in. beton ke atas lembaran baja bergelombang yang ditopang oleh balok anak rangka batang terbuka pada arah melintang, dan ditopang oleh balok rol pada arah lainnya.

Balok anak rangka jaringan terbuka biasanya dibuat dengan penyiku rangkap yang digunakan sebagai batang tekan bagian atas dan penyiku yang lebih kecil atau bahkan batangan baja yang dibentuk dan dilas bersama untuk membentuk rangka batang beban ringan yang biasanya dipakai untuk atap dan dek lantai. Istilah web terbuka *(open web)* mengindikasikan bahwa elemen penahan geser bukan merupakan batang solid seperti balok rol, dan istilah balok anak menunjukkan fakta bahwa elemen ini digunakan sebagai elemen bentang sekunder. Rangka batang ini sangat ringan, biasanya mempunyai berat 5 sampai 10 plf, dan sebagai hasilnya suatu balok anak tunggal hanya dapat menopang beban dek



GAMBAR 11.3

terdistribusi sebesar 150 – 500 plf. Jadi, balok anak rangka jaringan baja terbuka, seperti rangka batang kayu, harus diletakkan pada jarak yang dekat satu sama lain, biasanya antara 3 – 5 ft jauhnya.

Balok anak rangka jaringan terbuka tidak didesain untuk berdiri sendiri dan tegangan pada elemen ini tidak dihitung dengan cara yang sama seperti balok rol. Sebagai gantinya, para pembuat baja pabrikan menyediakan tabel bentang yang menunjukkan kapasitas beban terdistribusi untuk berbagai ukuran balok anak prafabrikasi yang tersedia. Para pembuat baja pabrikan biasanya juga menyediakan informasi bentang untuk lembaran plat baja.

Kita ingin menentukan ukuran balok utama yang cocok untuk menopang plat lantai dan atap. Pada kasus ini, atap akan digunakan sebagai

balkon terbuka, sehingga didesain untuk beban yang sama dengan lantai, yang untuk bangunan ini besarnya adalah 40 psf untuk beban mati dan 60 psf untuk beban hidup, sehingga total beban desain sebesar 100 psf. Kita memusatkan perhatian pada dua elemen interior yang tipikal yang diberi tanda *A* dan *B* pada gambar. Perhatikan bahwa berat dinding struktur terluar akan menambah beban merata pada balok utama bagian luar.

Luas daerah pembebanan balok utama *A* adalah $20 \times 40 = 800$ ft^2 yang tampak dari penampang melintang pada gambar. Beban total balok utama *A* adalah beban desain dikalikan luas daerah pembebanan, 100 lb/ft^2 $\times$ 800 ft^2 = 80.000 lb. Beban ini didistribusikan secara uniform sepanjang 40 ft bentang balok utama *A* oleh balok anak terdekat yang dilas ke sayap tekan bagian atas dari penampang W, yaitu sebesar beban desain dikalikan lebar daerah pembebanan, $w = 100 \times 20 = 2000$ plf. Beban uniform ini menghasilkan momen balok sederhana, $M = wL^2/8 = 2.000\ (40^2)/8 = 400.000$ ft-lb.

Karena balok anak mengikat sayap tekan secara menerus, tegangan lentur yang diijinkan untuk balok utama *A* adalah 24.000 psi, sehingga kita memerlukan modulus penampang sebesar

$$S_{\text{YANG DIBUTUHKAN}} = \frac{400.000 \times 12}{24.000} = 200 \text{ in}^3$$

Kita lihat pada tabel bentuk penampang W untuk balok dan menemukan penampang yang paling ringan dengan modulus penampang pada sumbu kuatnya sekitar 200 in^3 adalah W24 $\times$ 84. Kita periksa bahwa tegangan geser sebesar $f_V = V/A_W = \frac{1}{2} \times 80.000/11,3 = 3.500$ psi, masih di bawah tegangan geser yang diijinkan yang besarnya 14000 psi. Untuk balok baja bertegangan penuh seperti ini, lendutan adalah $D = 24.000(40 \times 12)^2/(5 \times 30.000.000 \times 24,1) = 1,5$ in, yang masih di bawah lendutan yang diijinkan $L/300 = 1,6$ in. (Anda boleh mencoba untuk memverifikasi bahwa untuk balok dengan pengikat bertegangan penuh dari baja A36, lendutan yang terjadi memadai untuk rasio L/h di bawah 21).

Kemudian kita lihat balok utama *B*, yang juga berupa balok sederhana dengan bentang 40 ft, tetapi dibebani oleh sebuah beban terpusat yang besarnya sama dengan reaksi dari dua balok utama *A* yang dihubungkan dengan *B* seperti terlihat pada sketsa Detail 2. Perhatikan pada gambar bagaimana luas daerah pembebanan *B* adalah 800 ft^2, sama dengan balok utama *A*, sehingga beban terpusat pada tengah bentang balok utama *B* adalah sama dengan beban total balok utama *A*, $P = 80.000$ lb. Kita sudah melihat bahwa untuk beban terpusat ini, $M = PL/4 = 80.000\ (40)/4 = 800.000$ ft-lb, dua kali momen yang terjadi pada balok utama *A*, karena jika beban terpusat pada tengah bentang didistribusikan sepanjang sebuah balok, terjadi momen sebesar dua kali momen lentur.

Kita akan memerlukan suatu penampang bentuk W dengan modulus penampang yang dua kali lebih besar dari modulus penampang balok utama *A*, karena momen yang terjadi dua kali lebih tinggi, dan juga karena tegangan lentur yang diijinkan harus dikurangi untuk mencegah tekuk pada sayap tekan. Untuk balok utama *A*, plat lantai dilekatkan ke bagian atas sayap melalui balok anak yang mengikat elemen tekan tersebut secara menerus. Tetapi untuk balok utama *B*, sayap tekan hanya diikat pada ujung-ujungnya dan di tengah bentangnya, dan sayap sepanjang 20 ft tanpa pengikat akan cenderung menekuk pada arah lateral di sekitar sumbu lemah penampang W.

Jika balok bentuk W harus mempunyai panjang sayap tekan tanpa pengikat yang besar, kita harus menggunakan bentuk W dengan sayap yang lebar dan tebal untuk meminimalkan kerampingan sayap. Analisis lengkap tentang elemen balok yang menekuk pada arah lateral cukup rumit, karena melibatkan efek gabungan tegangan tekan aksial, tegangan aksial torsi putar, dan geser torsi. Kita boleh mengabaikan kekuatan torsi bentuk W tanpa pengikat dalam memperkirakan kapasitas momennya. Kita menganalisis sayap sebagai kolom horisontal yang menerima tegangan tekan, $f = M/S$, dengan rasio kerampingan L/r, di mana L adalah panjang sayap tanpa pengikat dan r adalah jari-jari girasi sayap pada sumbu Y-Y penampang W. Perkiraan ini cukup baik untuk penampang sayap yang sempit, dan cukup konservatif untuk penampang W dengan sayap yang lebar dan tebal.

Jika balok utama *A* mempunyai sayap tanpa pengikat sepanjang 20 ft (240 in.), plat sayap persegi selebar 9 in. dari penampang W24 × 84 mempunyai jari-jari girasi r = 0,29(9) = 2,61 in, sehingga rasio kerampingan sayap adalah L/r = 240 / 2,61 = 92. Dari kurva tegangan tekan baja pada Bab 7, dengan rasio eksentrisitas 0,1 untuk rasio kerampingan 92, tegangan tekan yang diijinkan adalah 15.000 psi. Ini adalah pengurangan yang besar dari tegangan lentur penuh yang diijinkan yang paling mungkin terjadi, yaitu 24.000 psi.

Kita akan membicarakan lebih lanjut tentang sayap tekan tanpa pengikat (dan Gambar 11.3) ketika kita mendiskusikan balok-kolom baja. Sekarang, untuk tujuan desain dasar, kita akan mengasumsikan pengurangan tegangan lentur yang diijinkan pada sayap balok tanpa penopang lateral. Untuk sayap yang terikat penuh, tegangan lentur yang diijinkan adalah f_{IZIN} = 24.000 psi, sehingga kita asumsikan f_{IZIN} = 20.000 psi, dengan memperhitungkan kerampingan elemen tekan L/r = 65 dari kurva tegangan tekan baja dengan rasio eksentrisitas 0,1. Untuk balok utama *B*, modulus penampang yang diperlukan ditentukan kemudian, yaitu sebesar S = 800.000(12)/2.0000 = 480 in^3, dan kita memilih W27 × 161 dari tabel dengan S = 455 in^3. Lebar sayap adalah 14 in., Sehingga

jari girasinya adalah $r = 0{,}29(14) = 4{,}1$ in. dan rasio kerampingan sayap tanpa pengikat adalah $240/4{,}1 = 59$.

Dari kurva tegangan tekan dengan $L/r = 59$, tegangan sayap yang diijinkan adalah sekitar 21.000 psi, sehingga kapasitas momen $M = f_{IZIN} \times S = 21.000(455)/12 = 796.000$ ft-lb, dan harga ini dapat diterima. Dengan observasi, tegangan geser dan lendutan balok utama *B* lebih kecil dari balok utama *A*. Mengapa?

Latihan Kerjakan lagi soal ini dan pilih ukuran balok utama bagian dalam untuk penampang alternatif balok utama yang diperlihatkan pada gambar. Tentukan ukuran balok utama bagian luar dengan mengasumsikan beban uniform dinding sebesar 250 plf. Pada tempat di mana dinding menopang sebuah balok utama, balok utama bagian luar hanya ditopang pada arah lateral pada ujung-ujungnya dan pada pertengahan bentang.

11.3 KOLOM

Penampang W biasa digunakan sebagai kolom, meskipun penampang W bukanlah bentuk yang optimal untuk penampang melintang kolom, karena penampang itu jauh lebih ramping pada sumbu lemahnya dibandingkan dengan sumbu kuatnya ($L/r_Y > L/r_X$). Tetapi, kekurangan ini ditutup oleh keuntungan yang ditawarkan sayap terbuka dan plat badan penampang W yang memberikan kemudahan sambungan pada balok, seperti yang kita sebutkan ketika kita membicarakan sambungan. Dengan menggunakan kurva kolom baja yang menghubungkan tegangan tekan yang diijinkan terhadap kerampingan kolom pada Bab 7, sejumlah kurva kolom khusus dapat diturunkan untuk berbagai penampang W, seperti untuk berbagai ukuran pipa berongga persegi dan bundar yang tersedia.

Sebagai contoh, sama seperti yang kita lakukan pada kolom kayu, kita ingin membuat grafik yang dapat menunjukkan hubungan antara beban normal yang diijinkan, *F*, dengan panjang kolom tanpa pengikat *L* untuk berbagai penampang W pada daftar bentuk kolom pada Gambar 11.1. Kita asumsikan bahwa kolom disambung dengan pin pada kedua ujungnya dan tidak diikat, baik pada sumbu lemahnya maupun sumbu kuatnya, sehingga rasio kerampingan maksimum kolom untuk masing-masing penampang adalah L/r_Y. Untuk rumus kolom dengan beban eksentrisitas, rasio eksentrisitas diasumsikan sebesar 0,3, sehingga dasar tiga kurva tersebut dapat dipetakan, seperti yang sudah dibicarakan sebelumnya. Kita konversikan istilah tegangan ke gaya tekan aksial dengan menggunakan luasan *A* dari penampang W. Suatu faktor keamanan sebesar

2 diaplikasikan ke modulus elastisitas, sehingga E = 15.000.000 psi, dan gaya tekan kolom pendek maksimum dibatasi menjadi F_{MAKS} = 22.000 × A. Jika kita mengabaikan eksentrisitas dan menggunakan F_{MAKS} secara penuh ketika L = 0, gaya maksimum yang diijinkan untuk dipakai pada rumus haruslah sebesar F_{MAKS} × (1 + rasio eksentrisitas, atau 1,3). Dengan mensubstitusi nilai-nilai ini ke dalam rumus kolom dengan beban eksentiritas, kita dapatkan

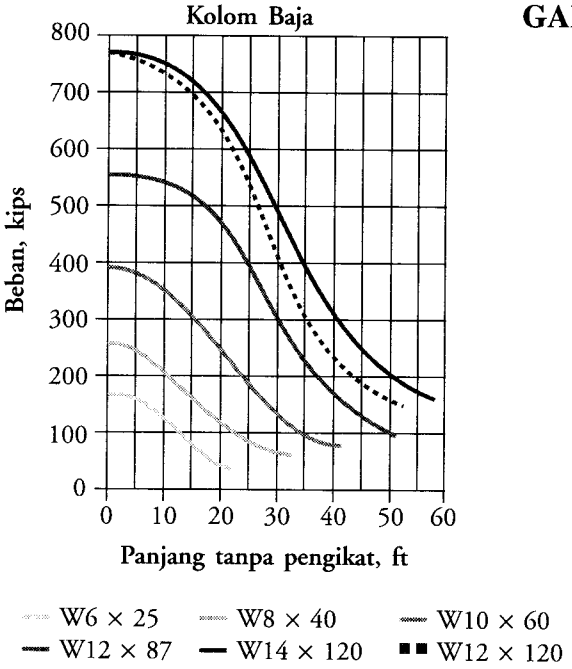
$$L = r_Y \times \sqrt{\frac{150.000.000(A)}{F_{IZIN}} - \frac{45.000.000(A)}{22.000(A) \times 1{,}3 - F_{IZIN}}}$$

Untuk setiap penampang W yang dipilih dengan nilai r_Y dan A tertentu, kita membuat suatu *spreadsheet* untuk L yang menggunakan sejumlah nilai F pada rumus tersebut. Jika kita membatasi kerampingan kolom tidak lebih dari L/r = 200, maka panjang maksimum untuk masing-masing kolom adalah L = 200 r_Y. Gambar 11.4 menunjukkan grafik yang dihasilkan untuk W8 × 40, W10 × 60, W12 × 87, W14 × 120, dan W12 × 120. W12 × 120 diplot pada gambar dengan garis putus-putus. Penampang ini termasuk dalam gambar karena mempunyai luas penampang melintang dan panjang kolom pendek yang sama dengan W14 × 120, tetapi karena luas penampangnya lebih dekat ke sumbu pusatnya, penampang ini lebih ramping sehingga kemampuan menahan bebannya lebih kecil karena kerampingannya bertambah.

Kita dapat menggunakan grafik kolom ini untuk menentukan tinggi lantai pertama yang diijinkan berdasarkan beban tekan ijin dari penampang W10 × 60 yang digunakan sebagai kolom bagian dalam struktur pada Gambar 11.3. Pembaca harus menentukan luas daerah pendukung untuk satu kolom bagian dalam, yaitu sebesar 40 ft × 40 ft = 1.600 ft^2 dan untuk tiga lantai sebesar 4.800 ft^2. Dengan beban desain atap dan lantai yang terdiri dari beban mati sebesar 40 psf dan beban hidup sebesar 60 psf, yang menghasilkan beban total = 100 psf, jumlah seluruh beban kolom dari atap dan dua lantai bagian atas adalah F = 100 × 4.800 = 480 kips. Dari grafik, kita lihat bahwa untuk F = 480 kips, penampang W10 × 60 tidak memadai untuk ketinggian lantai. Akan tetapi, penampang W12 × 87 dapat digunakan untuk ketinggian lantai 15 ft, penampang W12 × 120 untuk ketinggian 22 ft, dan penampang W14 × 120 dapat digunakan untuk ketinggian lantai 27 ft.

Sangat mustahil jika tiga lantai bangunan tersebut dibebani secara penuh dengan beban hidup sebesar 60 psf pada seluruh area seluas 1.600 ft^2 di setiap lantai pada waktu yang bersamaan. Kita sudah membicarakan sebelumnya bahwa, karena pembebanan tinggi yang mustahil ini, peraturan desain bangunan mengijinkan pengurangan beban hidup jika area yang mempengaruhi beban pada suatu elemen menjadi sangat luas. Hal ini

GAMBAR 11.4



lebih sering terjadi pada kolom daripada balok, karena balok bagian dalam menopang dua *bay* pada satu lantai, sedangkan kolom bagian dalam menopang empat *bay* dari masing-masing lantai di atasnya. Untuk kolom bagian dalam dan pondasinya, kita dapat mengurangi beban hidup desain untuk satu elemen kolom, maksimum sebesar 50% jika luas daerah pembebanannya melebihi 1.000 ft^2. Untuk kolom bagian luar tetapi tidak di pojok, luas daerah pembebanan yang diperlukan untuk dapat mengurangi beban hidup sebesar 50% adalah 2.000 ft^2, dan 4.000 ft^2 untuk kolom pojok.

Mungkin mengganggu pikiran Anda bahwa kita tidak mendesain untuk menahan beban hidup 60 psf secara penuh. Untuk mendapatkan kepastian, kita akan mendesain beban hidup sebesar $\frac{1}{2} \times 60 = 30$ psf yang diaplikasikan di atas daerah pembebanan kolom sebesar 4.800 ft^2. Dengan pengurangan beban hidup sebesar 50%, beban kolom menjadi $F = (40 + \frac{1}{2} \times 60)(4.800) = 336$ kips, dan dari grafik kolom baja, kita lihat bahwa penampang W10 × 60 dapat menopang beban ini dengan ketinggian tanpa pengikat 12,5 ft. Dari Gambar 11.1, kita lihat bahwa kita hanya memerlukan tinggi 12 ft, sehingga penampang W10 × 60 memadai sebagai kolom bagian dalam.

Kita juga dapat menggunakan rumus tersebut untuk menghasilkan tabel kolom sebagai pengganti grafik untuk semua penampang kolom W, sama seperti bentuk pipa berongga persegi dan bundar. Tabel ini dapat memperlihatkan beban yang diijinkan untuk panjang tanpa pengikat dari

4 ft sampai 48 ft dengan jarak penambahan 4ft. Kasus ini dapat dijadikan latihan untuk pembaca.

Prosedur untuk membuat grafik desain kolom dapat diterapkan untuk bentuk W pada Gambar 1.1 yang tidak tercantum dalam Gambar 11.4, atau untuk penampang W lainnya yang tersedia pada daftar di semua edisi *Manual Konstruksi Baja* AISC. Grafik seperti itu juga dapat dikembangkan untuk kolom pipa berongga persegi maupun pipa berongga bundar dengan ukuran yang berkisar dari 4 in. sampai 12 in, dengan jarak penambahan 2 in. dan ketebalan dinding $\frac{1}{4}$ in., $\frac{3}{8}$ in., dan $\frac{1}{2}$ in. untuk masing-masing ukuran.

Latihan Dengan menggunakan Gambar 11.4, berapa ukuran minimum kolom bagian luar untuk lantai dasar pada Gambar 11.3 jika panjang tanpa pengikatnya adalah 16 ft? Bagaimana dengan kolom interior pada lantai atas? Apakah beban kolomnya berbeda dari penampang balok utama lantai alternatif? ■

11.4 Balok-Kolom

Seperti yang kita lihat, ketika sebuah bentuk W digunakan sebagai kolom dengan normal tekan, balok itu cenderung untuk menekuk dan beban yang diijinkan terjadi padanya, F_{IZIN}, adalah suatu fungsi dari panjangnya tanpa pengikat, L, seperti diperlihatkan pada Gambar 11.4. Juga, ketika sebuah balok bentuk W menahan momen lentur, kecenderungannya untuk menekuk atau tidak ditentukan oleh diikat atau tidaknya sayap tekan pada arah lateralnya untuk suatu panjang yang dirasa perlu, dan kapasitas momennya berkurang jika panjang sayap tanpa pengikatnya bertambah. Ketika suatu bentuk W digunakan sebagai elemen yang menahan tekan rasional dan momen lentur, bentuk itu disebut balok-kolom, dan kita menggunakan rumus interaksi

$$\frac{F}{F_{IZIN}} + \frac{M}{M_{IZIN}} \leq 1$$

Seperti yang kita lakukan pada kolom bentuk W, untuk menggunakan rumus interaksi, kita harus membuat grafik yang menunjukkan hubungan momen balok yang diijinkan, M_{IZIN}, dengan panjang sayap tekan tanpa pengikat, L, untuk penampang W. Seperti yang telah disebutkan ketika kita mendesain balok utama lantai tanpa pengikat, dengan menganalisis sayap tekan sebagai kolom, kita mengabaikan kuat torsi yang cukup

signifikan dengan memakai bentuk W yang mempunyai sayap yang sangat lebar dan tebal. Sebelumnya kita telah memperlakukan sayap tanpa pengikat sebagai kolom dan memeriksa kurva tegangan tekan baja dengan $f = M/S_X$ dan rasio kerampingan, L/r, di mana r adalah jari-jari girasi sayap pada sumbu Y-Y penampang W. Anda dapat mencatat bahwa jari-jari girasi sayap bagian atas hampir sama dengan r_Y untuk seluruh penampang W, karena bagian badan mempunyai kontribusi yang sangat kecil pada besaran penampang melintang ini.

Rumus kolom dengan beban eksentris ini akan digunakan untuk membuat grafik hubungan M_{IZIN} dengan L. Karena tegangan lentur pada sayap tekan bersifat merata, rasio eksentrisitas sebesar 0,1 diasumsikan hanya untuk menghitung plat sayap yang membengkok, sedangkan rasio eksentrisitas sebesar 0,3 digunakan untuk kolom yang diasumsikan mengalami tekuk dan tegangan yang tidak merata karena beban terjadi di luar sumbu pusatnya. Istilah tegangan digantikan oleh momen dan suatu faktor keamanan sebesar 1,5 diterapkan untuk modulus elastisitas, sehingga E = 20.000.000 psi. Faktor keamanan sebesar 1,5 ini lebih rendah dari faktor keamanan sebesar 2 yang digunakan pada kurva tegangan tekan baja, karena kita sudah mengabaikan kuat torsi dari penampang yang melendut pada arah lateral.

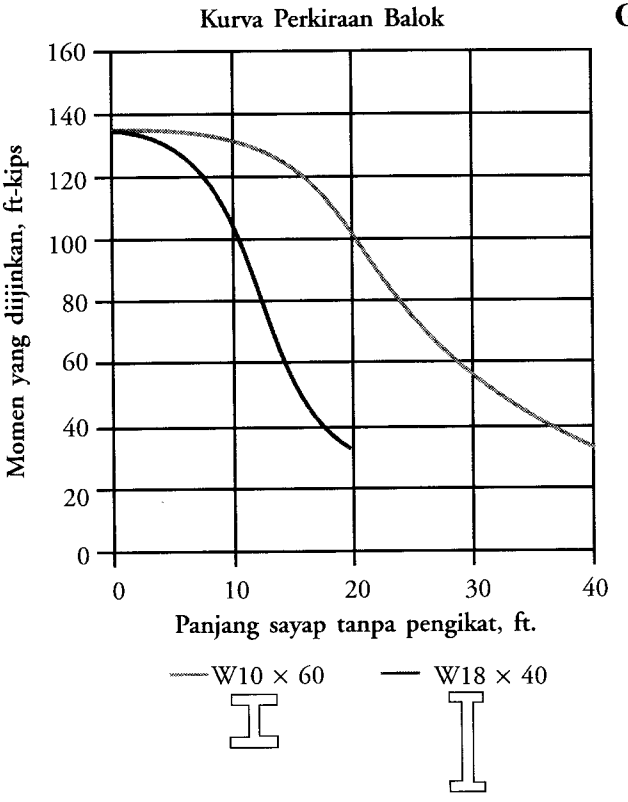
Tegangan tekan maksimum untuk kolom adalah 22.000 psi, tetapi untuk lentur, tegangan ijin maksimum adalah 24.000 psi untuk balok dengan pengikat penuh. Seperti pada kurva kolom, untuk momen maksimum yang sesuai dengan L = 0 yaitu $M_{\text{MAKS}} = 24.000 \times S_X$, kita harus mengalikannya dengan 1 + rasio eksentrisitas, atau 1,1 pada rumus. Kerampingan kritis adalah L/r_Y, sehingga kita dapatkan

$$L = r_Y \times \sqrt{\frac{200.000.000(S_X)}{M_{\text{IZIN}}} - \frac{20.000.000(S_X)}{24.000(S_X)(1{,}1) - M_{\text{IZIN}}}}$$

Gambar 11.5 memperlihatkan hasil penggunaan rumus untuk sepasang penampang W dengan harga modulus penampang yang hampir sama, tetapi dengan lebar sayap yang berbeda. Kita lihat bahwa dengan memakai penampang kolom W10 × 60 yang mempunyai ukuran sayap 10 in., dan penampang balok W18 × 40 dengan ukuran sayap 6 in, ada pengurangan kapasitas momen dengan bertambahnya panjang sayap tanpa pengikat. Pengurangan M_{IZIN} ini lebih besar untuk bentuk W18 yang bersayap sempit. Kita lihat bahwa penampang W10 yang bersayap lebar dapat menahan momen yang sama dengan balok bersayap sempit dengan merangkapkan penampang W18 dengan sayap tanpa pengikat. (Tetapi bagaimana dengan lendutannya?)

Perhatikan bahwa ketika diikat penuh, penampang W18 × 40 yang lebih ringan dapat menopang momen yang sama dengan penampang

GAMBAR 11.5



W10 × 60 hanya dengan menggunakan dua pertiga bagian baja, sehingga penampang ini jelas lebih efisien untuk diterapkan sebagai balok dengan pengikat. Juga karena lendutan vertikal diterina oleh tinggi penampang. ketika kedua penampang sama-sama menerima tegangan lentur, rasio lendutan penampang W18 terhadap penampang W10 adalah $\frac{10}{18} = 0{,}56$. Jadi, kita cenderung untuk menggunakan bentuk penampang yang lebih tinggi dengan sayap yang lebih sempit untuk balok dan mengurangi panjang sayap tanpa pengikat sedapat mungkin. Kita lihat penampang yang lebih pendek dan tebal digunakan sebagai kolom vertikal dan balok kolom karena elemen ini biasanya tanpa pengikat seluruhnya.

Bayangkan sebuah balok-kolom dari penampang W10 × 60 sepanjang 20 ft yang disambung dengan pin pada kedua ujungnya dan menahan sebuah gaya tekan aksial sebesar F = 120 kips dan momen lentur pada sumbu kuat sebesar M = 50 ft-kips. Untuk memeriksa kelayakan elemen ini dengan menggunakan rumus interaksi, dengan panjang tanpa pengikat L = 20 ft, kita mendapatkan F_{IZIN} = 220 kips dari Gambar 11.4 dan M_{IZIN} = 82 ft-kips dari Gambar 11.5. Dari rumus interaksi balok-kolom didapatkan

$$\frac{120}{220} + \frac{50}{100} = 0{,}55 + 0{,}50 = 1{,}05$$

Jika hasil persamaan interaksi lebih dari 1, maka tegangan yang terjadi pada elemen struktur melebihi kapasitasnya, seperti pada situasi ini.

Anggaplah kita dapat mengikat elemen struktur ini pada pertengahan tingginya sehingga panjang kolom tanpa pengikatnya dan panjang sayap tekan berkurang setengahnya menjadi L = 10 ft. Dari Gambar 11.5 dengan L = 10 ft, M_{IZIN} = 130 ft-kips. Kita pertama-tama perlu menentukan apakah kolom elemen itu akan menekuk pada sumbu lemahnya dengan panjang 10 ft, atau pada sumbu kuatnya dengan panjang penuh tanpa pengikat 20 ft. Dua rasio kerampingan yang terjadi adalah L/r_Y = 120/2,6 = 46 dan L/r_X = 240/4,4 = 55, sehingga elemen tersebut dipaksa untuk menekuk pada sumbu kuatnya. Karena Gambar 11.4 menunjukkan elemen tanpa pengikat yang melipat pada sumbu lemahnya, kita harus melihat grafik hubungan tegangan tekan baja vs. kerampingan dengan L/r = 55 dan kita mendapatkan f_{IZIN} = 17.000 psi. Jadi, F_{IZIN} = $f_{\text{IZIN}} \times A$ = 17.000 × 17,4 = 296 kips, dan persamaan interaksi menjadi

$$\frac{120}{296} + \frac{50}{130} = 0{,}41 + 0{,}38 = 0{,}79$$

Sekarang, hanya 79% kapasitas elemen yang digunakan dan penampang W10 × 60 dengan pengikat sudah memadai. Pengikat adalah segalanya bagi elemen baja yang mengalami tekan karena adanya kecenderungan elemen plat yang tipis untuk menekuk.

Latihan

Pada Detail 3 dari Gambar 11.3, kita melihat ketika beban aksial dari lantai-lantai atas, P', dan dua reaksi tambahan balok yang besarnya berbeda, R_1 dan R_2 yang lebih kecil, menghasilkan beban ekivalen, $P = P' + R_1 + R_2$, dengan eksentrisitas

$$e = \frac{(R_2 - R_1) \times m}{P}$$

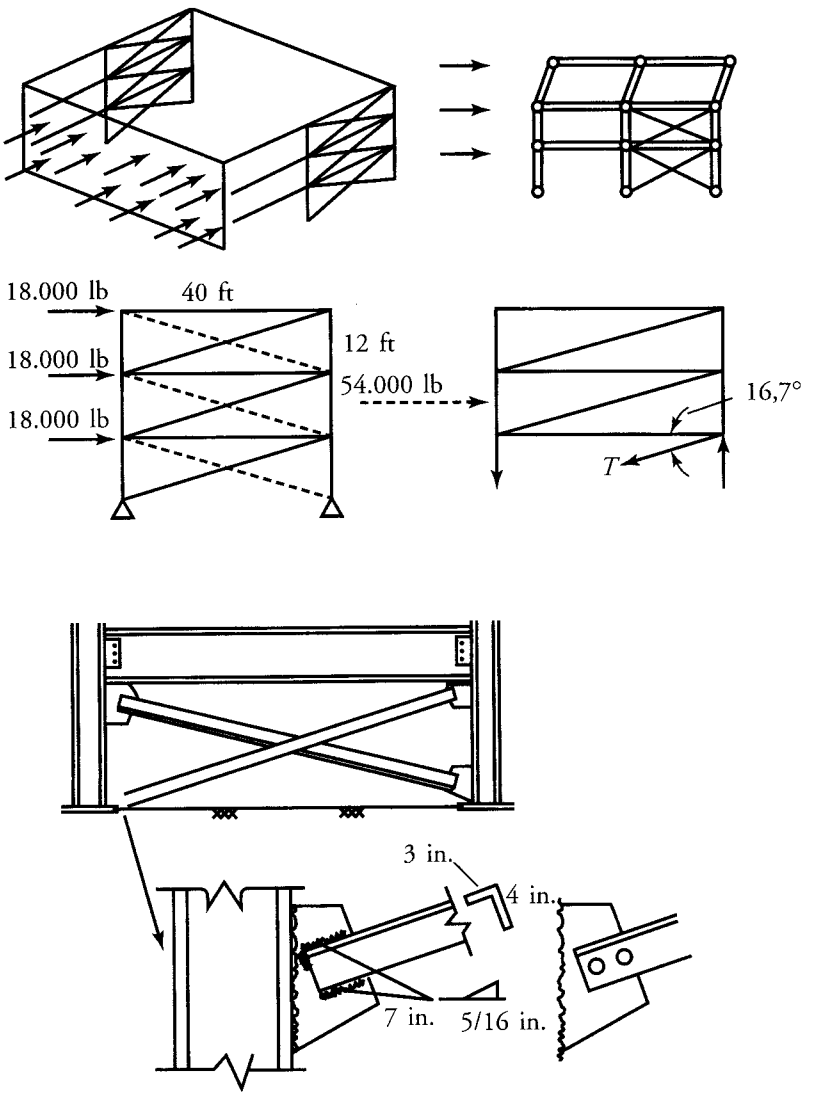
Jika beban 336 kip pada kolom bagian dalam seperti pada sebelumnya mempunyai eksentrisitas 4 in. dari sumbu kuatnya dan penampang W10 × 60 digunakan dengan tinggi lantai tanpa pengikat 12 ft, apakah elemen tersebut cukup memadai?

Anggaplah sebuah penampang W18 × 40 digunakan sebagai balok lantai yang merupakan batang tekan dari sebuah rangka batang dan membentang sepanjang 20 ft, menopang beban pada tengah bentang sebesar 8 kips dan sebuah gaya tekan aksial sebesar 80 kips. Elemen tersebut diikat pada ujung-ujungnya dan pada tengah bentang. Apakah elemen tersebut cukup memadai sebagai sebuah balok-kolom? Berapakah besar momen untuk balok-kolom ini? ■

11.5 Ikatan Angin (Wind Bracing)

Kita telah membicarakan beban vertikal pada bangunan tiga lantai pada Gambar 11.3, dan sekarang kita akan menyelidiki beban lateral angin. Gambar 11.6 menunjukkan ikatan angin diagonal yang dipasang pada dua portal terluar bangunan pada arah utara selatan. Tentu saja, ikatan angin juga harus dipasang pada arah timur dan barat. Seperti diperlihatkan, ikatan diagonal membentuk segitiga stabil yang mencegah balok dan kolom yang disambung dengan pin membentuk jajaran genjang dan mengalami keruntuhan yang ekstrim.

GAMBAR 11.6



Ikatan diagonal pada masing-masing lantai membentuk rangka batang vertikal yang mencegah tiga elemen diafragma, atap, lantai ketiga, dan lantai kedua, dari keruntuhan satu di atas yang lain sebagai akibat dari tekanan angin pada permukaan luas bangunan yang menyebabkan beban lateral yang besar. Rangka batang X adalah suatu struktur tidak tertentu, yang mempunyai banyak bagian lebih dari yang diperlukan untuk menopang beban tanpa runtuh. Karena beban angin untuk struktur bangunan bertingkat rendah lebih kecil, bangunan seperti ini boleh dipasangi ikatan angin dari penyiku ramping saja atau bahkan kabel, yang karena kerampingannya akan menekuk secara elastis bila menerima tekanan. Karena diagonal rangka batang tekan menjadi timpang dan mungkin diabaikan, maka rangka batang vertikal menjadi struktur tertentu yang cukup mudah untuk dianalisis.

Tekanan angin yang dihasilkan dari kecepatan angin rencana sebesar 100 mph adalah $q = 0{,}003\ (100)^2 = 25$ psf. Area bangunan yang menerima tekanan angin ini adalah $A = 120 \times 36 = 4.320\ \text{ft}^2$, sehingga jumlah beban lateral pada struktur karena angin pada arah utara-selatan adalah $F = 25 \times 4.320 = 108.000$ lb. Secara sederhana, kita akan membagi beban ini di antara masing-masing rangka batang saja, kemudian di antara tiga lantai di atas permukaan tanah, sehingga beban horisontal angin pada atap dan pada lantai ketiga serta kedua adalah $(\frac{1}{2} \times 108.000)/3 = 18.000$ lb. Ingat bahwa angin bisa saja bertiup dari arah lainnya, itulah sebabnya mengapa diagonal tarik rangka batang untuk beban dari arah lainnya juga disediakan dan membentuk ikatan X.

Kita lihat dari gambar bahwa kita dapat menganalisis rangka batang vertikal dengan metode penampang untuk menentukan gaya pada ikatan diagonal lantai dasar yang mempunyai beban paling kritis. Kita nyatakan sudut ikatan sebagai arc tan(12/40) = 16,7°, dan dari kesetimbangan gaya horisontal, kita tahu bahwa gaya horisontal pada ikatan T harus sama dengan jumlah beban lateral pada rangka batang vertikal

$$3 \times 18.000 = T \times \cos(16{,}7°)$$

Dari persamaan ini, kita lihat bahwa $T = 56.400$ lb, dan jika tegangan tarik baja yang diijinkan adalah 14.000 psi, kita lihat bahwa kita membutuhkan sebuah elemen pengikat dengan luas penampang melintang $A = 56.400/14.000 = 4\ \text{in}^2$. Gambar itu memperlihatkan bagaimana ikatan X pada tiap lantai dibentuk dengan menggunakan sepasang penampang $L4 \times 3 \times \frac{5}{8}$ yang dibaut atau dilas ke plat yang dibaut ke kolom. Kita tahu bahwa kekuatan sebuah lapisan las $\frac{5}{16}$ in. adalah 4.000 lb/in. sehingga panjang las $L = 56.400/4.000 = 14$ in. diperlukan untuk menyambungkan penyiku dengan kolom.

Untuk struktur bertingkat tinggi, peraturan bangunan menyebutkan bahwa beban lateral angin dan gempa bertambah pada lantai yang lebih

tinggi. Jadi untuk struktur-struktur ini, diperlukan lebih banyak ikatan yang kuat, khususnya untuk lantai di tingkat yang lebih rendah, di mana rangka batang K yang berat atau dinding geser masif dapat digunakan. Lubang elevator *(elevator core)* juga dapat digunakan sebagai bagian dari sistem penahan beban lateral. Untuk bangunan dengan tinggi yang ekstrim yaitu bertingkat sampai 30 – 100 lantai atau lebih, sistem khusus untuk penahan beban lateral sudah dirancang. Misalnya, dengan mengikat semua kolom bagian luar dengan ikatan X untuk membentuk suatu rangka keliling yang solid, sebuah struktur 100 lantai dengan beban lateral didesain untuk menahan beban lateral sebagai balok kantilever vertikal yang mempunyai penampang melintang pipa berongga yang efektif.

Latihan Kerjakan lagi bangunan ini dengan angin yang bekerja pada dua rangka batang vertikal yang menahan beban pada arah timur-barat.

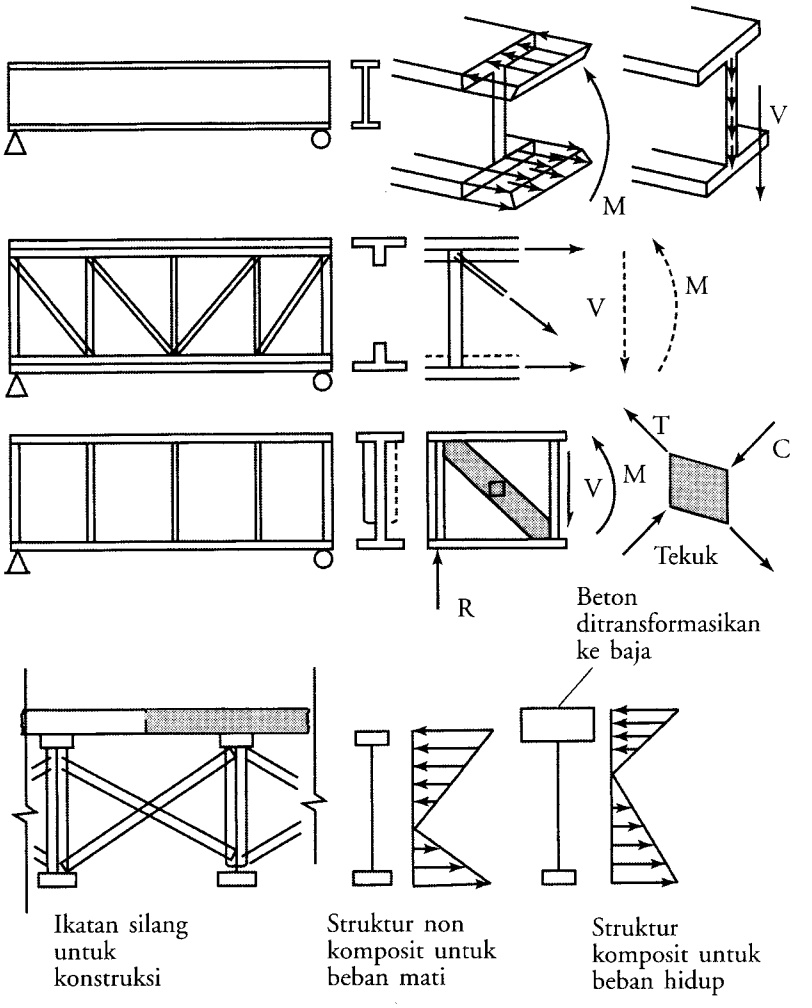
Misalkan ikatan X digantikan oleh sebuah dinding geser yang dibuat dari satuan blok beton pembuat dinding padat *(concrete masonry units/ CMU)* dengan tegangan geser rata-rata sebesar 20 psi (berdasarkan kekuatan *mortar*). Apakah dinding geser sepanjang 40 ft tersebut memadai? Bagaimana jika *mortar* dengan kekuatan yang lebih rendah digunakan dan tegangan yang diijinkan hanya 12 psi? ■

11.6 Jembatan Balok utama Plat

Mari kita lihat lebih dekat bagaimana elemen plat baja yang tipis harus bekerja menahan tegangan, dan kemudian kita akan membahas balok utama jembatan besar. Kita lihat pada Gambar 11.7 bagaimana flens pada penampang balok yang mempunyai flens lebar menahan momen lentur, karena bagian tersebut adalah tempat di mana sebagian besar penampang menahan tegangan lentur dalam intensitas besar, sedangkan bagian web menahan tegangan geser. Meskipun ada sebagian momen lentur yang ditahan oleh web, persentasenya hanya sekitar 10% atau lebih sedikit dari momen total yang terjadi. Cobalah untuk membuktikannya sendiri.

Kita dapat meningkatkan kapasitas momen dari sebuah elemen berflens lebar dengan memotongnya pada garis netralnya dan memisahkan dua penampang T yang terbentuk. Dengan menempatkan penampang T beberapa jarak dari sumbu titik beratnya, dapat dihasilkan suatu luas penampang melintang dengan momen inersia dan modulus penampang yang jauh lebih besar. Dengan menghubungkan kedua penampang T tersebut dengan menggunakan elemen vertikal dan diagonal, kita membuat suatu elemen rangka batang yang dapat digunakan pada bentang yang

GAMBAR 11.7



cukup besar. Rangka batang ini sebenarnya adalah balok I besar dengan batang bagian atas dan bawah yang berperan sebagai sayap dan elemen vertikal dan diagonal berperan sebagai web. Batang menahan kopel gaya sedangkan elemen vertikal dan diagonal menahan geser.

Balok utama plat seperti ditunjukkan pada gambar umumnya digunakan untuk struktur jembatan dengan bentang yang panjang sebagai pengganti rangka batang. Balok utama plat adalah balok I rakitan yang dibentuk dengan mengelas bersama 3 plat baja, dan tidak seperti balok rol yang diproduksi dengan tinggi kurang dari 4 ft, balok utama plat dapat difabrikasi dengan tinggi sampai 15 ft atau lebih. Golongan plat dapat digunakan sebagai pengganti rangka batang karena lebih mudah untuk dibuat di pabrik dan penampilannya pun lebih estetik dalam berbagai situasi.

Balok utama plat adalah semacam campuran antara balok rol berflens lebar dan rangka batang. Walaupun terlihat seperti balok rol, balok utama plat jauh lebih besar dengan bentang seperti rangka batang yang bisa mencapai ratusan kaki. Lebih dari itu, badan balok utama plat yang berupa plat baja tipis menahan geser lentur dengan cara meniru perilaku struktural rangka batang diagonal dan vertikal. Perhatikan bagaimana plat pengkaku vertikal yang kecil dilas ke plat jaringan balok utama yang tinggi dan tipis. Pengkaku ini menjaga jaringan yang tipis tersebut dari kemungkinan tekuk jika terjadi tegangan tekan. Pengkaku pendukung dengan ketinggian penuh ditambahkan ke jaringan pada ujung balok utama untuk menghasilkan semacam kolom yang menyalurkan reaksi terpusat balok, *R*, ke penopang.

Kita lihat panel persegi dibentuk sepanjang bentang oleh sebuah plat pengkaku yang dilas ke jaringan. Plat pengkaku ini mencegah jaringan mengalami kegagalan tekuk diagonal yang disebabkan oleh tekan sebagai akibat efek runtuh dari geser balok. Masing-masing pengkaku bekerja bersama sebagian plat baja untuk membentuk penopang tekan vertikal pada jaringan yang menahan komponen vertikal dari tekanan diagonal jaringan. Seperti terlihat pada gambar, pada arah diagonal yang berlawanan, daerah plat jaringan yang diarsir menahan tarikan yang disebabkan oleh keruntuhan geser dari panel.

Jadi, suatu sistem seperti rangka batang dengan tekan vertikal dan tarik diagonal terbentuk di dalam jaringan balok utama plat. Kita dapat membayangkan perpotongan pengkaku vertikal dengan ujung pengikat yang diarsir sebagai suatu sendi pada batang paralel suatu rangka batang. Analisis kapasitas geser jaringan dengan pengkaku patut dilakukan, tetapi kita tidak akan membicarakan secara detail masalah ini. Cukup kita katakan bahwa semakin dekat jarak antar pengkaku, semakin besar pula kemampuan jaringan untuk menahan geser.

Kita lihat pada gambar bahwa jembatan dengan balok utama baja dan dek beton terdiri dari banyak balok utama plat baja (atau balok rol untuk bentang yang lebih kecil) yang diletakkan berdampingan dan membentang sejajar arah jalan raya. Balok utama-balok utama ini, pada gilirannya, menopang suatu plat dek beton yang merupakan suatu balok plat yang membentang dari balok utama ke balok utama pada arah melintang. Ikatan X, disebut diafragma, dibaut ke plat pengkaku yang dilas ke badan balok utama. Diafragma-diafragma ini berjarak 25 ft satu sama lain sepanjang bentang untuk menyediakan stabilitas lateral dari balok utama baja selama masa konstruksi, khususnya untuk flens balok utama bagian atas yang menahan tegangan lentur tekan yang disebabkan oleh beban mati jembatan dan bekisting dek beton.

Jika sambungan geser, yang biasanya berupa baut dengan panjang $\frac{3}{4}$ in., dilas setiap jarak 1 kaki atau lebih sepanjang flens bagian atas sebelum

penuangan dek beton, maka ketika dek mengeras, penampang baja dan dek beton akan menjadi satu. Sekarang, jembatan akan menahan beban hidup kendaraan sebagai suatu struktur komposit baja dan beton. Keuntungan utama jembatan komposit adalah bahwa tegangan akibat beban hidup dan lendutan berkurang, karena besaran penampang dari penampang melintang baja ditambah sayap beton komposit lebih besar daripada balok utama baja yang bekerja sendiri, sehingga lebih sedikit baja yang diperlukan untuk menjaga tegangan agar tidak melampaui batas.

Membuat flens atas penampang baja jauh lebih kecil daripada flens tarik bagian bawah adalah suatu cara yang umum dipakai untuk mengoptimalkan penggunaan baja karena diperlukan baja yang cukup besar untuk menopang bekisting dek dan cukup tebal untuk menahan tekuk lateral selama masa konstruksi. Ketika dek mengeras, sayap tekan komposit yang besar dan dikopel melalui badan oleh sayap tarik besar bagian bawah menahan tegangan lentur akibat beban hidup.

Untuk memeriksa tegangan lentur sebuah jembatan balok utama plat, kita pusatkan perhatian pada sebuah balok utama. Kita tentukan beban matinya dengan menentukan luas daerah pembebanan dek, dan kita tentukan tegangan lentur yang dihasilkan beban ini pada penampang melintang baja dengan menggunakan besaran penampang pada sumbu kuat di titik beratnya, momen inersia I dan modulus penampang S. Kemudian, kita tentukan desain beban hidup pada arah longitudinal dan transversal, yang mana yang menyebabkan momen akibat beban hidup yang lebih besar dan menghitung tegangan yang terjadi akibat momen ini. Tegangan lentur total pada balok utama sesungguhnya adalah superposisi dari tegangan akibat beban mati dan beban hidup.

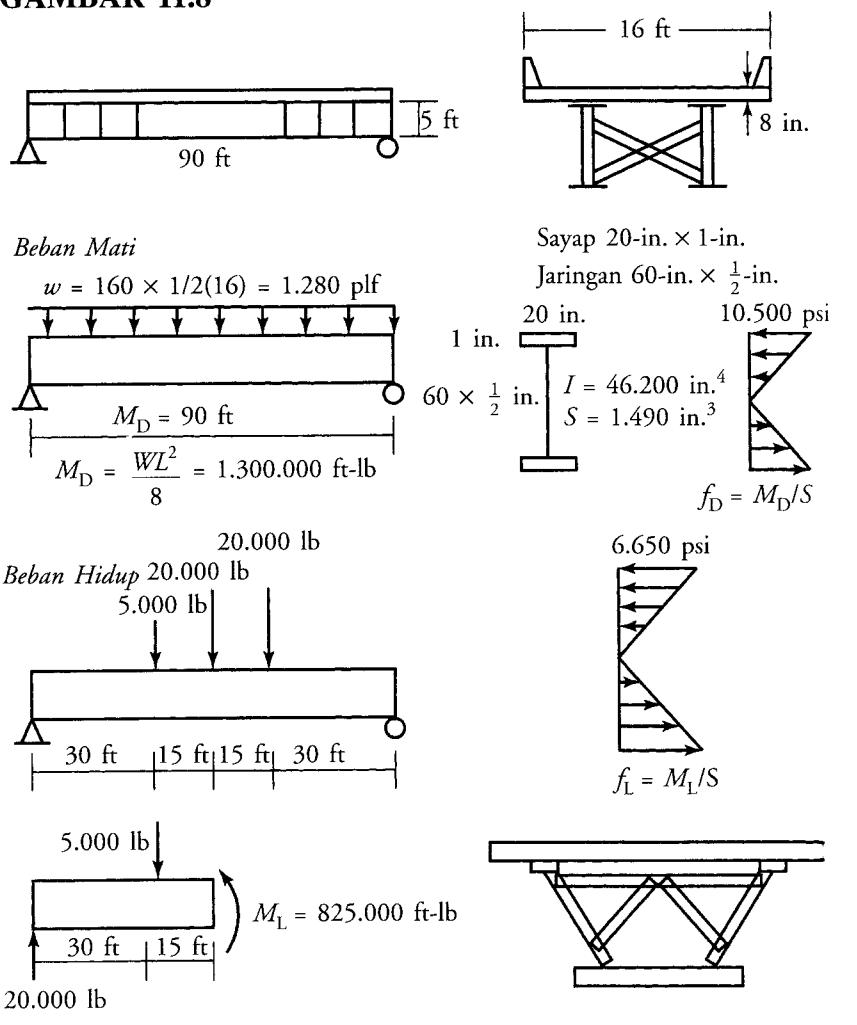
Jika dek dibuat komposit dengan penampang baja, kita akan membagi rata flens beton ke masing-masing balok utama baja dan menghitung besaran dari penampang komposit dan menentukan tegangan lentur akibat beban mati yang diterima penampang komposit. Untuk menentukan besaran penampang balok utama komposit, beton ditransformasikan ke baja dengan menggunakan rasio modular $n = E_S/E_C \approx 8$. Karena penampang melintang tidak simetris pada arah vertikal, kita menentukan letak sumbu titik berat dan menentukan besaran penampang, I dan S pada sumbu ini. Untuk menghitung tegangan lentur aktual yang terjadi pada sayap beton yang ditransformasikan ke baja, kita membagi tegangan pada daerah transformasi yang sudah dihitung dengan rasio modular.

Sebagai contoh, kita dapat mengganti rangka batang jembatan yang kita bicarakan pada Bab 3 dengan balok utama plat yang mempunyai sayap 20 in. × 1 in. dan badan 60 in. × $\frac{1}{2}$ in. seperti yang diperlihatkan pada Gambar 11.8. Dua balok utama nonkomposit ini dihubungkan dengan diafragma ikatan silang pada setiap jarak 22,5 ft untuk kestabilan

struktur dan untuk menyediakan kekakuan struktur secara keseluruhan. Kita asumsikan berat dek beton dan baja adalah 160 psf pada luasan dek, tetapi sebagai pengganti beban terpusat pada sendi rangka batang, dihasilkan beban merata sepanjang bentang 90 ft sebesar w = 1.280 plf seperti diperlihatkan. Kita juga mengasumsikan bahwa jumlah beban hidup dari kendaraan ditahan oleh salah satu dari dua balok utama, sama seperti rangka batang yang bekerja sendiri, dan seperti diperlihatkan pada gambar, beban hidup sudah dikonversikan dari satuan ton ke pon.

Pembaca harus memeriksa momen akibat beban mati dan beban hidup yang diperlihatkan pada gambar, seperti besaran penampang yang dilaporkan sebesar S = 1.490 in^3, dan I = 46.200 in^4, dan tegangan yang terhitung. Total tegangan lentur maksimum akibat beban mati dan beban hidup adalah f = 10.500 + 6.650 = 17.150 psi pada sayap, yang dapat diterima untuk tegangan tarik sayap yang diijinkan untuk balok utama plat sebesar 22.000 psi.

GAMBAR 11.8



Meskipun tiang penampang geser tidak digunakan, seperti pada konstruksi nonkomposit, dek beton yang sudah mengeras biasanya membungkus sayap bagian atas dan mengikatnya secara penuh dari kemungkinan tekuk. Tetapi, kita harus memeriksa apakah tegangan tekan sayap akibat beban mati, f = 10.500 psi, yang terjadi pada sayap bagian atas tanpa pengikat sudah di bawah tegangan tekan yang diijinkan. Selama masa konstruksi, sayap adalah sebuah elemen tekan yang ramping dengan panjang tanpa pengikat antara portal diafragma sebesar 22,5 ft. Sayap bagian atas cenderung untuk menekuk pada arah lateral pada sumbu lemah balok utama bentuk I dengan rasio kerampingan, L/r = (22,5 × 12)/(0,29 × 20) = 47. Dari kurva tegangan tekan baja, f_{IZIN} = 21.000 psi, sehingga tegangan lentur balok utama plat kelihatannya sudah meyakinkan.

Bentuk lain dari jembatan baja menggunakan penampang balok utama kotak, yang mempunyai jaringan (*web*) vertikal, atau jaringan yang miring yang membentuk kotak trapesium, seperti diperlihatkan pada gambar. Sebenarnya, balok utama kotak dapat dianggap sebagai dua balok utama plat yang mempunyai sebuah flens bawah yang umum, dan kebutuhan yang sama akan pengkaku badan dan ikatan diafragma. Di samping bentuk estetik dari permukaan yang licin yang diperlihatkan oleh penampang kotak tertutup, bentuk seperti ini mempunyai kekakuan terhadap torsi, yang membuatnya sangat difavoritkan untuk struktur yang melengkung pada arah horisontal.

Latihan

Kerjakan lagi soal balok utama plat ini dengan menggunakan lebar sayap 15 in. Bandingkan lendutan akibat beban hidup pada bentang 90 ft dengan batas lendutan yang diijinkan sebesar $L/1.000$.

Sebagai tantangan, tentukan tegangan pada sayap balok utama plat selebar 20 ft jika sayap tersebut beraksi komposit dengan dek setebal 8 in.

Anda akan memerlukan teorema sumbu paralel, yang menyatakan bahwa momen inersia I dari suatu luasan A pada sumbu di luar sumbu sentroid atau titik beratnya adalah

$$I = I_{NA} + A(d^2)$$

Dalam rumus ini, I_{NA}, adalah momen inersia luasan pada sumbu titik beratnya, dan d adalah jarak antara kedua sumbu paralel.

Kita tahu bahwa untuk penampang melintang yang simetris, modulus penampang $S = I/(\frac{1}{2} \times h)$, digunakan untuk menghitung tegangan lentur, $f = M/S$, pada bagian atas dan bawah ketinggian penampang melintang. Pada kasus penampang melintang yang tidak simetris, jarak pada penyebut $(\frac{1}{2} \times h)$ digantikan oleh jarak dari sumbu sentroid atau titik berat ke suatu titik sepanjang ketinggian penampang melintang di mana tegangan yang terhitung sebesar $f = M/S$. ■

12 PENERAPAN PADA DESAIN STRUKTUR BETON

12.1 ANALISIS LENTUR PADA BALOK

Ketika kita membicarakan struktur tanah pada Bab 9, kita mendiskusikan sedikit detail desain beton bertulang. Dalam bab ini, kita akan melihat komponen-komponen penting struktur beton yang dicor di tempat, slab, balok anak, balok induk, dan balok-kolom, di mana semua komponen ini biasanya dicor secara monolit ke dalam bekisting yang dapat dipindahkan. Hasilnya adalah suatu rangka atau portal kaku yang elemen-elemennya dilekatkan secara menerus dan berbagi beban melalui sambungan momennya. Struktur beton bertulang dapat dibentuk menjadi sejumlah bentuk tertentu, tetapi kolom linear dan sistem balok bangunan sudah sangat umum sehingga semua gambaran dasar teknologi struktur beton harus berhubungan dengan subjek ini.

Bentuk lain dari struktur beton adalah konstruksi pracetak, di mana elemen plat, balok, dan kolom dibuat di pabrik dan dibawa ke lapangan, seperti balok I dan kolom pada struktur baja. Biasanya, sambungan antarelemen pada struktur beton pracetak berupa sambungan *pin* sederhana yang tidak menyalurkan momen antarelemen yang disambung. Ikatan lateral pada struktur seperti ini sering dilakukan dengan membentuk sistem diafragma, dan/atau mengikat portal terhadap pilar lubang elevator yang bekerja sebagai balok kantilever vertikal yang kaku. Karena elemen pracetak dibuat di bawah pengawasan yang ketat di pabrik, kita bisa mempergunakan pratekan untuk mendapatkan elemen yang lebih ringan dan lebih kuat, seperti yang akan kita bicarakan kemudian.

Kita mulai dengan bahan utama pembuat beton, yaitu semen, bahan berupa bubuk halus yang dibentuk dengan menghancurkan batu kapur dan tanah liat yang sudah dibakar dalam sebuah pembakaran kapur. Beton adalah campuran semen, air, agregat pasir dan kerikil, dan kadang-kadang ditambahkan juga senyawa kimia untuk mengubah kekuatan campuran beton dan/atau untuk membuatnya lebih mudah dikerjakan. Bahan-bahan ini dicampur menjadi suatu bubur beton basah yang dapat dibentuk menjadi balok, kolom, slab, pondasi, tapak, busur, dinding, dinding penahan, dan kubah.

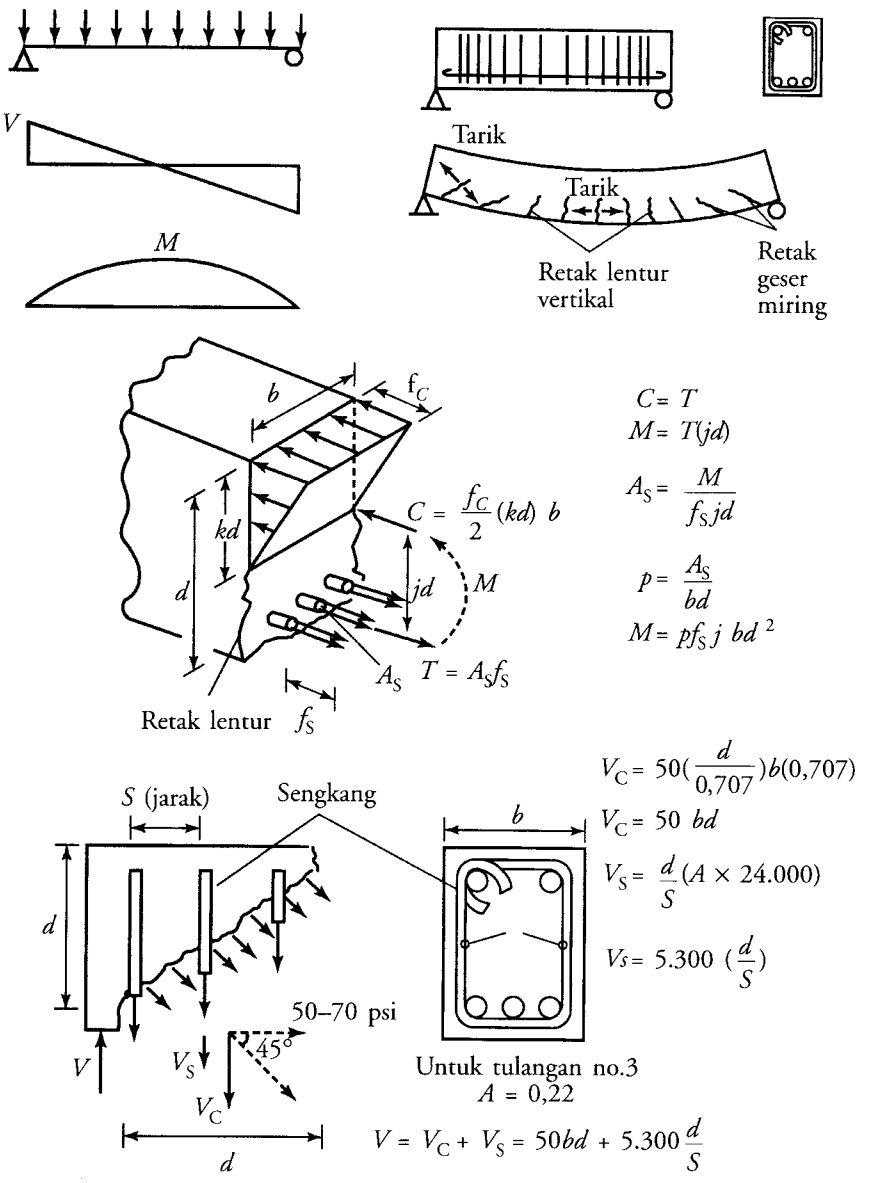
Kekuatan beton biasanya dinyatakan sebagai kegagalan kuat tekan dari sebuah silinder eksperimental yang dibiarkan untuk membentuk dan mengeras selama 28 hari. Kekuatan tekan beton pada umur 28 hari berkisar antara 3.000 psi sampai 20.000 psi, bergantung pada perbandingan campuran dan pemakaian senyawa kimia, dengan kuat tekan beton yang normal sebesar 4.000 psi. Beton lemah dalam hal kemampuannya menahan tarik, dan akan mengalami kegagalan retak secara tiba-tiba pada tegangan tarik sekitar 400 sampai 500 psi.

Ketika kita menggunakan istilah struktur beton, kita biasanya membayangkan suatu struktur dengan elemen komposit yang terbuat dari batang tulangan baja dan beton yang mengeras. Karena beton mempunyai kekuatan tarik kecil yang dapat diabaikan, beton harus diperkuat dengan bahan yang dapat menahan tegangan tarik seperti baja. Batang baja mutu 60, disebut tulangan, dibuat di pabrik dari baja dengan tegangan batas elastis (leleh) sebesar 60.000 psi dan merupakan jenis tulangan baja yang paling umum digunakan pada struktur beton.

Batang tulangan mutu 60 meningkatkan bengkak yang melingkari permukaan kelilingnya, yang membuatnya dapat membentuk ikatan erat yang sangat baik dengan beton yang membungkusnya, sehingga kedua bahan itu membentuk aksi komposit ketika menerima tegangan. Tulangan yang digunakan untuk balok mempunyai ukuran nominal batang no. 3 sampai no. 9, dan ukuran nominalnya adalah jumlah penambahan $\frac{1}{8}$ in. dari diameter tulangan, sehingga tulangan no. 3 mempunyai diameter $\frac{3}{8}$ in, no. 9 mempunyai diameter $\frac{9}{8}$ in., dan seterusnya. Dengan menggunakan tulangan baja yang kecil dalam jumlah yang banyak sebagai pengganti tulangan yang besar dalam jumlah kecil, pengawasan retak lentur akan menjadi menjadi lebih baik. Ukuran tulangan yang lebih besar, no. 10, no. 11, no. 14, dan no. 18 biasa digunakan untuk penulangan kolom di mana persentase tulangan baja yang lebih besar diperlukan dan retak lentur tarik tidak terlalu menjadi soal.

Kita ingin mengembangkan beberapa hubungan yang mendasar antara kapasitas momen balok beton dan tampak penampang melintangnya. Desain sebuah balok beton terutama melibatkan penentuan berapa lebar b, tinggi h, dan luas baja longitudinal A_S yang diperlukan untuk menahan momen lentur desain maksimum tanpa melebihi tegangan ijin bahan. Tegangan tekan lentur yang diijinkan untuk beton normal adalah 1.800 psi, sedangkan untuk tulangan mutu 60, tegangan tarik lentur yang diijinkan adalah 24.000 psi.

Gambar 12.1 melukiskan sebuah balok beton dengan bentang sederhana. Untuk bentang sederhana, bagian bawah balok menerima tarik lentur yang disebabkan oleh momen lentur positif, dan tulangan longitudinal dibujurkan sepanjang bagian bawah dan dilengkungkan pada ujungnya, mungkin dengan membentuk kait sederhana pada ujung



GAMBAR 12.1

tulangan, seperti diperlihatkan. Tulangan longitudinal mencegah retak lentur vertikal yang dominan terjadi pada daerah lapangan balok, yang disebabkan oleh baji tegangan tarik lentur yang lebih rendah searah tulangan. Kita dapat melihat perlunya tulangan sengkang geser untuk mencegah retak miring pada bagian tumpuan balok.

Pada gambar, kita melihat penampang melintang sebuah balok beton pada bagian di mana momen desain menyebabkan tegangan maksimum, seperti pada daerah lapangan balok sederhana. Kita tahu bahwa tekan

lentur dan tekan tarik yang terjadi pada penampang melintang sebuah balok semakin bertambah sesuai jaraknya dari sumbu netral. Seperti yang kita lihat pada gambar, ketika kita mengasumsikan beton yang mendapat tegangan tarik menjadi retak dan tidak efektif, semua tegangan tarik disalurkan ke tulangan longitudinal.

Baji tegangan tekan lentur yang bekerja di atas sumbu netral menghasilkan gaya tekan $C = \frac{1}{2} f_C b(kd)$, yang bekerja pada titik berat baji yang terletak sejauh $kd/3$ dari bagian atas penampang. Penampang balok menahan momen lentur, M, melalui aksi kopel C-T, seperti diperlihatkan. Kopel gaya tarik, $T = f_S A_S$, harus sama dengan dan berlawanan arah dengan gaya tekan C, dan dua gaya tersebut dipisahkan oleh lengan momen, $jd = (1 - k/3)/d$. Jadi, kapasitas momen balok adalah $M = C(jd)$, atau rumus yang lebih berguna $M = T(jd) = f_S A_S(jd)$, dan kita dapatkan $A_S = M/(f_S jd)$.

Kemudian kita tentukan rasio baja (persentase baja jika dikalikan 100%) pada penampang melintang efektif beton sebagai $p = A_S / bd$. Untuk rasio baja di bawah $p = 0{,}0141$, kapasitas momen ditentukan oleh tegangan tarik baja yang diijinkan, $f_S = 24.000$ psi, dan tegangan tekan beton lebih kecil dari yang diijinkan, $f_C = 1.800$ psi. Lengan momen kopel diperkirakan $jd = 0{,}9d$, sehingga kita mendapatkan

$$A_S = \frac{M}{21.600 \times d}$$

Rumus ini digunakan untuk menentukan luas tulangan yang diperlukan untuk menahan momen pada sebuah balok dengan tebal efektif yang diketahui d, yang seringkali ditentukan berdasarkan batas lendutan.

Kita ingin mendesain persentase baja sebuah balok secara optimal sehingga kapasitas momen dapat dicapai ketika baik baja maupun beton diberi tegangan penuh sampai batas yang diijinkan. Ini disebut balok yang setimbang, dan persentase bajanya adalah 1,41%. Pembaca harus memeriksa bahwa jika $p = A_S/bd = 0{,}0141$, $f_C = 1.800$ psi, $f_S = 24.000$ psi, $k = 0{,}375$, dan $j = 0{,}875$. Karena $M = f_S A_S (jd) = pf_S jbd^2$, kapasitas momen kesetimbangan balok didapatkan sebesar

$$M = (0{,}0141)(24.000)(0{,}875) \times bd^2 \approx 300 \times bd^2$$

Harga ini dapat dianggap sebagai momen maksimum yang diijinkan untuk balok beton persegi dengan persentase baja 1,4%. Jadi, bagi desain balok, kita dapat mengatakan bahwa tegangan lentur efektif yang diijinkan adalah 300 psi untuk balok beton persegi dengan modulus penampang efektif, bd^2, untuk mengalami retak.

Biasanya, desain balok yang persentase bajanya melebihi 1,4% tidaklah menguntungkan. Hal ini disebabkan karena peningkatan penambahan

rasio baja p tidak sebesar penambahan kapasitas momen seperti bila $p <$ 0,014. Baja juga tidak berfungsi penuh dan kelebihan persentase baja pada penampang melintang tersebut membuat penempatannya menjadi sulit dan lebih sukar bagi bubur beton untuk dapat mengisi penuh jarak antar tulangan.

Anggaplah balok sederhana pada gambar mempunyai bentang 24 ft dan menahan beban merata atau terdistribusi, w = 2.000 plf. Balok ditopang oleh kolom persegi 16 in, dan lebar kolom biasanya menentukan lebar balok, b. Kita akan memperkirakan ukuran balok 16 in. × 24 in, sehingga balok dengan panjang 1 ft akan mempunyai berat 150 lb/ft × $\frac{16}{12}$ ft × $\frac{24}{12}$ ft × 1 ft = 400 lb/ft. Selanjutnya kita perkirakan w = 2.400 plf, dan momen desain adalah $M = 2.400\ (24^2)/8 = 172.800$ ft-lb atau 2.074.000 in-lb. Karena kapasitas balok adalah $M = 300bd^2$, kita dapatkan:

$$d = \sqrt{\frac{2.074.000}{300 \times 16}} = 21 \text{ in.}$$

Jadi tinggi efektif yang diperlukan dari bagian atas penampang balok ke pusat tulangan longitudinal adalah d = 21 tetapi tinggi balok keseluruhan h biasanya sebesar d + (2,5 – 3,5) in. Kelebihan jarak ini diperlukan untuk menyediakan ruang bagi jari-jari tulangan, diameter sengkang, dan penutup beton setebal 1,5 in. untuk semua tulangan baja pada balok. Penutup tersebut terutama berguna untuk menjamin agar baja diikat dengan baik oleh beton dan juga terlindung dari kebakaran. Kita akan menggunakan h = 24 in. dan perhatikan bahwa perkiraan berat balok cukup akurat.

Karena kita mendesain sebuah balok yang setimbang, kita memerlukan luas tulangan lentur baja 1,4% sehingga

$$A_S = pbd = (0{,}014)(16 \times 21) = 4{,}7 \text{ in}^2$$

Ukuran dan jumlah tulangan yang kita pilih untuk memenuhi luasan ini harus diperhitungkan terhadap kenyataan bahwa ruang antara bagian dalam kaki vertikal sengkang dibatasi oleh lebar balok dikurangi dua kali diameter sengkang ditambah dua kali 1,5 in. tebal penutup. Di samping itu, kita memerlukan jarak sekurang-kurangnya 1 in. antara masing-masing tulangan agar agregat besar pada bubur semen dapat mengalir dengan mudah dan membungkus tulangan ketika beton dituangkan serta digetarkan di atas bekisting.

Kita lebih suka menggunakan satu lapisan tulangan dengan ukuran tulangan yang sekecil mungkin ketimbang menggunakan jumlah tulangan yang lebih sedikit dengan ukuran yang lebih besar. Jadi, kita memakai 6 tulangan no.8 yang mempunyai A_S = 4,71 in^2. Jika sengkang no. 3 digunakan, lebar balok yang diperlukan untuk 6 tulangan berdiameter 1 in. dengan 5 × jarak 1 in. di antaranya adalah 2 × ($\frac{3}{8}$ + 1,5) + 6 + 5

= 14,8 in. yang kurang dari 16 in. Kita mencoba untuk menggunakan lebar balok yang memungkinkan kita untuk menggunakan selapis tulangan saja, walaupun kadang-kadang kita terpaksa menggunakan dua lapis. Dalam contoh ini, kita dapat menempatkan dua lapis tulangan dari 8 buah tulangan no. 5 yang dipisahkan sejauh 1 in. atau lebih, dengan sentroid atau titik pusatnya masih berjarak 21 in. dari bagian atas balok, dan tidak diperlukan tambahan waktu dan kerumitan penempatan 16 tulangan dengan cara ini.

Misalkan bahwa kita ingin menggunakan sebuah balok ukuran 14 × 28 sebagai pengganti ukuran 16 × 24. Sekarang kita mempunyai suatu keadaan di mana dimensi dan momen telah ditetapkan, dan kita harus menentukan luas tulangan baja yang diperlukan. Kita tahu $A_S = M/(21.600 \times d)$, dan dengan mengasumsikan $d = 25$ kita dapatkan

$$A_S = \frac{2.074.000}{21.600 \times 25} = 3{,}84 \text{ in}^2$$

Kita dapat menggunakan 5 tulangan no. 8 dengan $A_S = 3{,}93$ in^2 dan lebar balok yang diperlukan adalah 12,8 in.

Latihan

Buktikan bahwa untuk rasio baja $p = 0{,}0141$ pada penampang melintang balok persegi, $k = 0{,}375$, $j = 0{,}875$, dan $M = 295\ (bd^2)$ untuk desain seimbang.

Desainlah suatu balok sederhana agar membentang 18 ft dan menahan suatu beban hidup $w = 1500$ plf, dengan mengasumsikan bahwa lebar balok adalah $\frac{1}{3}$ dari tingginya.

Tentukan jumlah tulangan no.7 yang diperlukan untuk panel slab pracetak jembatan berbentang sederhana sepanjang 20 ft yang mempunyai ukuran lebar 4 ft dan tinggi 1 ft. Beban desain adalah berat panel slab itu sendiri ditambah gaya 16.000 lb pada pertengahan bentang, sama dengan setengah beban poros belakang truk. Sengkang tidak digunakan di sini dan kebutuhan penutup hanya $\frac{3}{4}$ in., sehingga asumsikan $d = h - 1$ in. Jika persentase tulangan baja yang seimbang digunakan, berapa beban yang diijinkan pada pertengahan bentang? ■

12.2 Penulangan Geser

Begitu lebar dan tinggi penampang melintang sebuah balok dan kebutuhan tulangan longitudinalnya telah ditentukan, penulangan terhadap geser harus ditentukan pula. Kita lihat pada gambar bahwa efek retak akibat geser, di mana yang paling parah terjadi pada bagian ujungnya,

menyebabkan tarik pada arah diagonal, yang menyebabkan retak diagonal. Tulang berdiameter kecil (tulangan no. 3 atau no. 4) diikatkan sekitar tulangan longitudinal (dan beberapa tulangan bagian atas yang biasanya ada) untuk memberikan penulangan geser. Pengikat ini dinamakan sengkang, dan harus diletakkan cukup dekat untuk mencegah retak miring yang terbentuk pada tempat di mana tegangan geser cukup tinggi sampai melebihi kapasitas geser lentur beton yang diijinkan, sekitar 50 – 70 psi.

Seperti pada pengkaku sepanjang jaringan balok utama plat baja, semakin dekat sengkang diletakkan dalam sebuah balok beton, semakin tinggilah kapasitas geser balok, dan jarak sengkang yang dibutuhkan bervariasi sesuai diagram geser balok. Untuk elemen beton bertulang dengan lebar b dan tinggi efektif d, kita dapat mengatakan bahwa tegangan geser akibat geser pada sebuah penampang, V, adalah

$$f_V = \frac{V}{bd}$$

Secara umum, ketika tegangan geser balok yang sudah dihitung, $f_V = V/bd$, ada dalam kisaran 50 –70 psi, sengkang diperlukan dan harus diletakkan dengan jarak tidak lebih dekat dari 4 in., atau lebih dari setengah tinggi efektif balok d. Bahkan ketika tegangan geser yang sudah dihitung f_V di bawah 50 psi dan beton dapat menahan geser sendirian, adalah praktek yang baik, khususnya pada daerah rawan gempa, untuk menempatkan sengkang pada jarak yang tidak lebih dari tinggi efektif balok d.

Selain melihat tegangan, kita harus melihat keseluruhan penahan geser pada balok. Kita lihat pada gambar bahwa kapasitas geser sebuah balok adalah jumlah kekuatan beton, V_C, dan kekuatan sengkang berjarak s, V_S, dan untuk sengkang no. 3, kapasitas geser dari sebuah balok beton persegi adalah

$$V = V_C + V_S = 50bd + 5.300(d/s)$$

Untuk sebuah balok dengan bentang sederhana 24 ft dengan ukuran 16 in. × 24 in., yang menopang w = 2.400 plf, geser maksimum pada penopang adalah $V = wL/2$ = 2.400 (24/2) = 28.800 lb. Kapasitas beton sendiri adalah V_C = 50(16)(21) =16.800 lb. Jadi, kapasitas sengkang yang diperlukan adalah V_S = 28.800 – 16.800 = 12.000 lb. Dengan persamaan V_S = 5.300 (d/s), kita dapatkan bahwa jarak sengkang yang diperlukan untuk dipasang pada daerah tumpuan adalah s = 5.300(21)/12.000 = 9,3 in.

Ini adalah cara menempatkan sengkang yang umum, yaitu dengan memasangnya pada jarak yang rapat pada daerah tumpuan, sementara peraturan bangunan menyebutkan semakin jauh jaraknya dari tumpuan, d, geser yang terjadi semakin rendah. Jarak sengkang yang diperlukan

pada balok dengan beban terdistribusi, bervariasi sepanjang balok tersebut, dengan sejumlah jarak sengkang yang baru setiap jarak beberapa kaki.

Latihan Berapa kapasitas geser yang diberikan oleh sengkang no. 3 yang diberi jarak $d/2$? Bagaimana pula dengan sengkang no. 4?

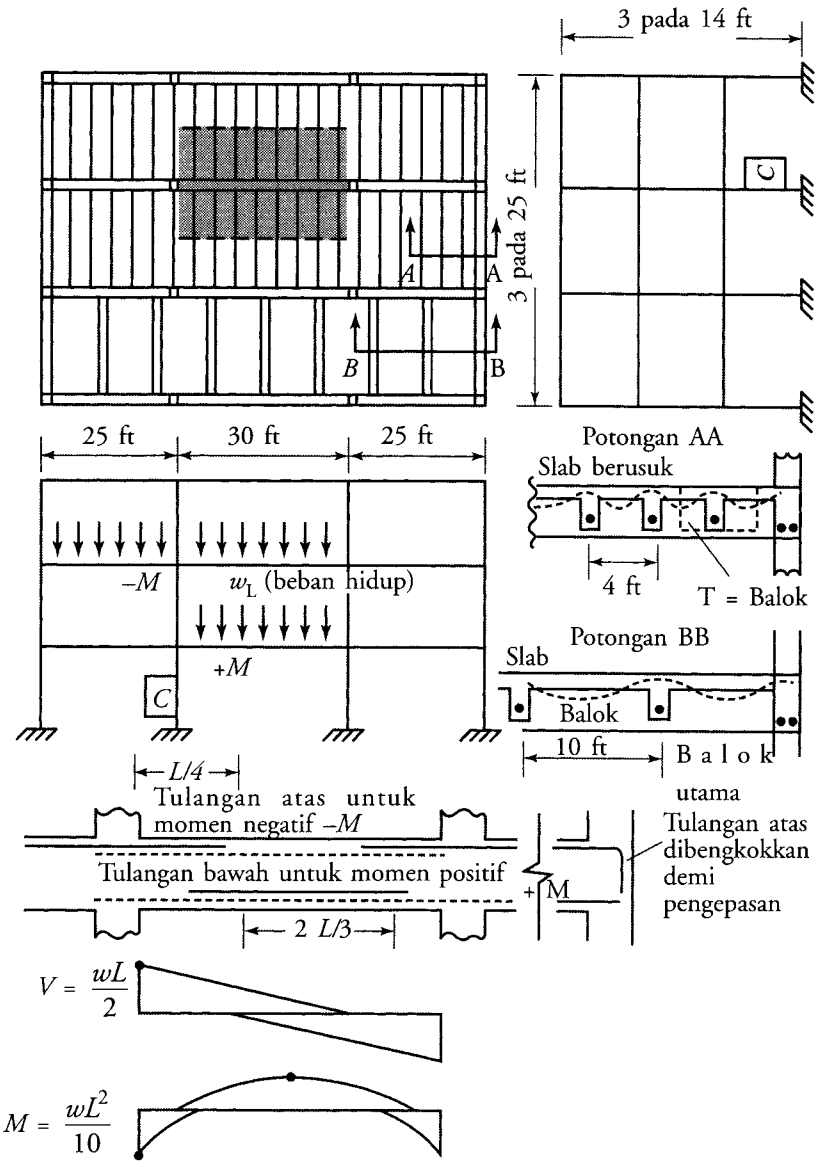
Sebuah balok bentang dengan penampang 14-in. × 28-in dan sengkang no. 3 mendukung beban hidup di tengah-bentang sebesar 24.000 lb. Berapalah penjarakan sengkang pada topangan? Apakah jarak yang dibutuhkan banyak bervariasi di sepanjang bentang?

Berapakah tegangan geser dalam panel slab jembatan yanag menopang beban di tengah bentang sebesar 16.000 lb. Bagaimana jika beban berpindah ke dalam kaki topangan? ■

12.3 Portal Menerus

Gambar 12.2 menunjukkan, bahwa di antara bagian-bagian lainnya, balok menerus merupakan bagian dari suatu portal momen beton. Portal menerus cukup umum untuk struktur beton cor di tempat karena struktur ini dapat dibuat dalam banyak bentuk dengan bantuan bekisting. Jadi, adalah hal yang mudah untuk membuat balok monolit dan sambungan balok dan kolom. Portal seperti ini adalah struktur tak tentu, dan kita harus membuat asumsi untuk menyederhanakan struktur tak tentu tersebut menjadi struktur tentu. Portal kaku ini (juga disebut portal momen) lebih sulit untuk dianalisis, dan portal-portal ini dapat mengalami kelebihan tegangan pada beberapa situasi di mana terjadi penurunan tanah atau perubahan suhu. Tetapi, portal kaku juga mempunyai keuntungan, karena struktur menerusnya menghasilkan struktur yang lebih kaku dengan lendutan dan goyang arah lateral yang lebih kecil. Struktur menerus juga mempunyai efek pengurangan momen maksimal balok sebesar 20% atau lebih dengan mendistribusikan beban, mengambil alih tugas bentang balok ke bentang yang berdekatan dan terikat dengannya, dan bahkan ke kolom penopangnya.

Balok menerus menerima baik momen lentur positif maupun negatif. Jadi, selain momen desain positif bentang sederhana sebesar $wL^2/8$, balok menerus didesain untuk momen positif pada pertengahan bentang maupun momen negatif pada ujung bentang sebesar $wL^2/10$, seperti yang diperlihatkan. Momen desain ini biasanya memperhitungkan banyak faktor dalam analisis portal kaku tak tentu, seperti rotasi sendi, penempatan pola beban, asumsi kekakuan elemen, dan redistribusi beban inelastis.



GAMBAR 12.2

Penempatan pola beban hidup menghasilkan diagram geser dan momen yang tidak biasa seperti yang diperlihatkan pada gambar. Beban hidup diatur dalam berbagai pola pada suatu portal menerus karena beban hidup yang mengakibatkan balok berada dalam kondisi momen positif yang paling buruk tidak sama dengan pola beban yang menghasilkan momen negatif maksimum. Beban hidup pada bentang yang berdekatan menghasilkan momen negatif yang tertinggi pada daerah tumpuan,

sedangkan beban hidup pada bentang menghasilkan momen positif tertinggi pada daerah lapangan. Dengan menggambarkan semua momen dan geser positif dan negatif tertinggi yang terjadi pada setiap bagian sepanjang balok sebagai amplop, kita mendapatkan sebuah diagram yang disebut diagram *amplop geser dan momen*. Diagram amplop ini membekali perancang dengan harga geser dan momen desain maksimum beserta gambaran di mana tulangan baja dapat dikurangi. Amplop geser dan momen ini adalah hal-hal yang kritis dalam perancangan jembatan, di mana efek terburuk yang paling mungkin terjadi dari beban truk yang bergerak harus kita perhitungkan.

Dengan pembalikan lentur pada elemen balok menerus, terjadi tarikan sepanjang bagian bawah seperti tarikan pada bagian atas balok di daerah tumpuannya. Tulangan longitudinal dibujurkan sepanjang daerah lentur tarik dan dilebihkan beberapa kaki ke daerah tekan bentang yang berdekatan. Gambar memperlihatkan di mana tulangan baja biasanya diletakkan sepanjang balok menerus.

Kita akan mendesain balok utama bagian dalam pada arah timur-barat yang diperlihatkan pada gambar. Ukuran kolom biasanya menentukan lebar balok utama dalam bentuk portal beton yang monolit, karena kita lebih mudah untuk membuat sambungan kolom dan balok jika keduanya mempunyai lebar yang sama. Kita akan lihat bahwa tegangan efektif yang diijinkan untuk kolom beton bertulang adalah sekitar 1.000 psi. Anggaplah bahwa seluruh beton yang digunakan untuk plat dan balok utama dek lantai (dan atap balkon terbuka) mempunyai rata-rata 8 in. untuk struktur bangunan tiga lantai pada gambar. Jadi beban mati satuan lantai adalah $(\frac{8}{12})150 = 100$ psf.

Asumsikan beban hidup sebesar 60 psf untuk bangunan ruang kelas suatu universitas. Kolom bagian dalam lantai dasar menopang luasan daerah pembebanan sebesar $3 \times [(30 + 25)/2 \times 25] = 2.060$ ft^2. Seperti yang dibicarakan pada Subbab 11.3, kita dapat mengurangi beban hidup desain nominal sebesar 50% karena luas daerah pembebanan melebihi 1.000 ft2. Jadi, beban desain total untuk kolom adalah $(100 + \frac{60}{2}) \times 2.060 = 268.000$ lb, dan dimensi yang diperlukan untuk kolom persegi adalah $\sqrt{268.000/1.000} = 16{,}4$ in. Karena perkiraan ini tidak menyertakan beban eksentrisitas atau momen beban lateral, kita akan mengasumsikan kolom yang sedikit lebih besar yaitu 18 in. × 18 in. dan kita mempunyai balok utama lantai selebar 18 in.

Untuk desain balok utama lantai yang menerima beban hidup penuh yang lebih besar di atas luasan daerah pembebanannya (yang lebih kecil dari luasan yang ditopang oleh kolom lantai bawahnya), kita gunakan beban mati dan hidup secara penuh sebesar 100 + 60 = 160 psf. Sistem lantai struktur terdiri dari slab satu arah, yang bekerja seperti sistem dek *plywood* dan balok anak kayu, di mana slab beton tipis yang seragam

dipasangi pengkaku dengan bagian badan seperti diperlihatkan pada potongan AA pada gambar. (Kita lihat desain plat lantai pada bagian berikutnya). Luasan daerah pembebanan dari balok utama 30 ft diperlihatkan pada gambar, dan dengan lebar daerah pembebanan 25 ft, besar beban uniform adalah $w = 160 \times 25 = 4.000$ plf. Ingatlah bahwa beban mati ini sudah mewakili rata-rata seluruh beban elemen beton pada sistem lantai, sehingga kita tidak perlu menambahkan perkiraan berat balok.

Momen desain balok utama menerus pada daerah lentur positif dan negatif adalah $M = 4.000\ (30^2)/10 \times 12 = 4.320.000$ in-lb, sehingga untuk desain balok yang seimbang, tinggi efektif yang diperlukan adalah

$$d = \sqrt{4.320.000/(300 \times 18)} = 28 \text{ in.}$$

Kita akan mengasumsikan tinggi balok utama 32 in. Luasan baja yang diperlukan adalah

$$A_S = (0{,}014)(18 \times 28) = 7{,}1 \text{ in}^2$$

Kita pilih 7 tulangan no. 9 dengan luas $A_S = 7$ in^2. Ketika menggunakan tulangan yang lebih besar dari ukuran no. 8, jarak yang diperlukan antar tulangan sama dengan diameter tulangan, sehingga kita mempunyai lebar balok yang diperlukan (asumsikan sengkang menggunakan baja no. 3) sebesar $2 \times (\frac{3}{8} + 1{,}5) + 7(\frac{9}{8}) + 6(\frac{9}{8}) = 18{,}4$ in, yang bisa dikatakan sudah memadai.

Kita biasanya memasang tulangan bagian atas secara menerus melalui kolom dan-jarak bentang pada dua bentang yang berdekatan. Ketika bentang tersebut membentuk portal dengan kolom bagian luar, tulangan bagian atas harus dipasang beberapa kaki ke dalam kolom untuk mengembangkan kekuatan tariknya, jadi tulangan tersebut harus diikat untuk memperkuat, seperti yang diperlihatkan pada gambar. Di samping itu, peraturan bangunan menyebutkan bahwa bagian semua tulangan bagian bawah harus dipasang menerus sepanjang seluruh elemen. Praktik umumnya adalah memasang setidaknya sepasang tulangan kecil sepanjang seluruh bagian atas dan bawah balok, khususnya pada daerah rawan gempa di mana daktilitas tambahan disediakan oleh tulangan baja. Tulangan menerus ini juga memungkinkan sengkang geser pada portal untuk dilingkarkan dan diikat. Jarak sengkang geser untuk bentang menerus sama dengan jarak sengkang balok sederhana.

Lihat Gambar 12.3 sejenak, mari kita lihat kolom sebuah portal momen menerus yang bekerja bersama balok utama untuk menahan momen negatif pada sendi penopangnya. Pertama-tama, kita lihat kolom bagian luar yang membentuk portal dengan balok utama dari satu sisi saja dan menyalurkan momen negatif yang ditahan balok utama sebesar

$M = wL^2/10 = 100$ ke titik penghubung seperti diperlihatkan. Ketika momen yang tidak seimbang ini diterapkan, tiga elemen yang dihubungkan secara monolit tersebut berbagi beban sebesar aksi rotasi $M = 100$ sesuai arah jarum jam yang merotasikan titik penghubung dalam besar yang belum diketahui. Rotasi ini memaksa tiga elemen berhubungan tersebut melentur dan menahan lenturan ini dengan tiga momen berlawanan arah yang sama sebesar $\frac{100}{3}$. Titik penghubung ini dibawa ke suatu kesetimbangan dengan momen balok utama yang dikurangi sampai ke harga $M = 100 - \frac{100}{3} = 66{,}6$, dan dua kolomnya masing-masing menahan momen sebesar $M = 33{,}3$, seperti diperlihatkan. Ini menunjukkan proses pembagian beban pada elemen yang dihubungkan secara kaku.

Ketika dua balok utama membentuk portal dua arah pada sebuah titik penghubung yang monolit, momen tak seimbang yang ditahan oleh kolom biasanya tidak sebesar momen pada kolom bagian luar seperti yang sudah dijelaskan, khususnya bila kedua bentang mempunyai panjang yang sama. Tetapi, jika kedua bentang mempunyai panjang yang berbeda, dan kita menempatkan beban hidup penuh pada bentang yang lebih panjang, mungkin dihasilkan momen tak seimbang pada titik penghubung, yang harus kita perhitungkan. Mari kita lihat titik penghubung bagian dalam pada Gambar 12.2, di mana balok utama sepanjang 25 ft dan 30 ft bertemu. Momen pada ujung bentang yang lebih pendek akibat beban mati saja adalah $M = 2.500\ (25^2)/10 = 156.000$ ft-lb, dan $M = 4.000\ (30^2)/10 = 360.000$ ft-lb untuk bentang yang lebih panjang dengan pembebanan penuh dari beban mati dan beban hidup. Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 12.3, dihasilkan momen kolom sebesar 51.000 ft-lb, atau 51 ft-kips.

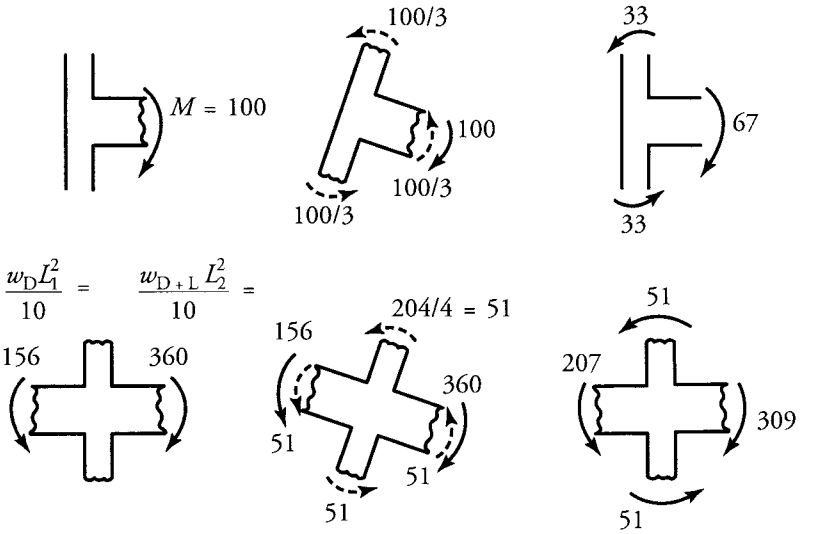
Untuk membedakannya dari momen beban lateral yang bekerja pada portal tanpa pengikat yang disebabkan oleh angin atau gempa bumi, Momen kolom akibat beban mati dan hidup vertikal ini disebut momen gaya berat.

Latihan

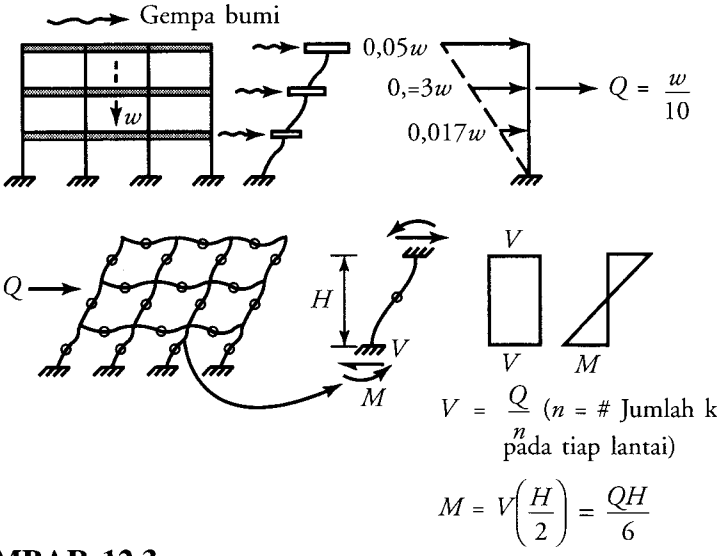
Tentukan tulangan baja yang diperlukan pada sebuah balok utama bagian luar arah timur-barat yang berdimensi 18×32. Berapakah jarak sengkang yang dibutuhkan pada peletakan?

Berapakah tinggi minimum balok utama bagian luar yang diperlukan dengan menggunakan desain seimbang? Berapakah ukuran dan jarak tulangan yang diperlukan? Berapakah jarak sengkang yang dibutuhkan pada peletakan?

Berapakah besar momen gaya berat pada kolom bagian luar dari suatu portal bagian dalam? ■



Semua momen dinyatakan dalam satuan ft-kips



$V = \frac{Q}{n}$ (n = # Jumlah kolom pada tiap lantai)

$M = V\left(\frac{H}{2}\right) = \frac{QH}{6}$

GAMBAR 12.3

12.4 Sistem Slab dan Lantai

Salah satu elemen struktur beton yang paling umum adalah slab beton bertulang yang bekerja seperti balok yang menopang beban mati ditambah beban hidup uniform per kaki persegi w di atas bentang berjarak beberapa kaki sampai 60 kaki atau lebih, tergantung dari bagaimana slab itu ditopang atau ditulangi. Ketika digunakan pada sistem dek atap dan lantai, kebanyakan slab dibuat menerus di atas beberapa bentang, seperti yang diperlihatkan potongan AA dan BB pada Gambar 12.2. Secara

umum, karena slab begitu lebar, kita menganalisis satu jalur slab selebar 1 ft sebagai balok beton dengan bentang yang sama dengan slab dan lebar penampang melintang, b = 12 in. dan tinggi h. Ketebalan slab, h, dan bentangnya, L, umumnya dibatasi untuk mencegah lendutan yang berlebihan, dan harus sekurang-kurangnya $L/25$ untuk bentang menerus, atau $L/20$ untuk bentang sederhana. Karena lebar balok adalah 12 in., atau 1 ft, beban pada luasan per kaki daerah pembebanannya *(tributary area)* dinyatakan sebagai w, maka momen desain adalah $M = wL^2/8$ untuk bentang sederhana, dan $M = wL^2/10$ untuk bentang menerus.

Selain penutup beton untuk perlindungan tulangan baja setebal 1,5 in. pada balok utama, ketebalan penutup beton yang diperlukan untuk perlindungan tulangan slab hanya $\frac{3}{4}$ in. Juga, tidak seperti pada balok utama, di mana beban dari luasan daerah pembebanan berupa beban terpusat, reaksi pada tumpuan slab didistribusikan sepanjang lebarnya yang besar, sehingga tegangan geser pada slab cukup rendah dan sengkang biasanya tidak diperlukan. Selanjutnya, pusat tulangan baja berada pada jarak sekitar 1 in. baik dari bagian bawah slab maupun dari bagian atas slab, sehingga tinggi efektif balok diperkirakan sejauh $d = h - 1$ in. dari bagian atas slab. Jika slab cukup tipis, seperti ketika membentang melintang di atas sejumlah balok yang berjarak cukup dekat, seperti pada Potongan AA, selapis tulangan baja mungkin diletakkan pada pertengahan ketebalan slab untuk berfungsi baik sebagai tulangan positif maupun negatif. Analisis balok slab, dengan dimensi dan momen desain yang sudah ditentukan, sederhananya adalah cara menentukan berapa tulangan baja per kaki lebar slab yang diperlukan.

Peraturan bangunan mengharuskan agar sekitar 0,2% tulangan longitudinal dipasang baik pada arah lebar maupun searah bentang slab untuk mencegah terbentuknya retak akibat penyusutan slab beton akibat berlalunya waktu dan perubahan temperatur. Kebutuhan tulangan karena suhu dan susut ini *(temperature and shrinkage,* T&S*)* didasarkan pada tebal balok sebenarnya, sehingga $AS = 0{,}002\ (bh) = 0{,}024\ (h)$ in^2/ft lebar. Kasus yang umum terjadi adalah bahwa tuntutan untuk tulangan lentur kurang dari 0,2% tulangan longitudinal, khususnya untuk bentang yang pendek, sehingga tuntutan tulangan akibat suhu dan susut lebih menentukan desain. Karena tulangan diperlukan pada kedua arah slab, lebih mudah bagi kita untuk untuk membangun slab dengan menggunakan jaring kawat yang dilas *(welded wire mesh)* yang dibentuk dari tulangan baja berdiameter kecil berjarak 6 – 12 in. dari as ke as. Jarak antartulangan yang umum seharusnya tidak lebih dari 12 in.

Untuk slab dengan bentang menerus sepanjang 10 ft seperti diperlihatkan pada Potongan *BB* pada gambar, kita ingin menentukan tebal slab, tulangan lentur atas dan bawah, dan keperluan tulangan suhu dan susut. Untuk mencegah lendutan yang berlebihan, slab harus

mempunyai ketebalan sekurang-kurangnya $h = L/25 = 10(12)/25 = 6$ in., sehingga ketebalan efektifnya adalah $6 - 1 = 5$ in untuk lapisan tulangan atas dan bawah. Beban uniform adalah $w = 160$ plf pada balok selebar 1 ft dengan bentang menerus 10 ft, sehingga momen desain positif dan negatif adalah $M = 160(10^2)/10 \times 12 = 19.200$ in-lb/ft lebar slab.

Tulangan lentur atas dan bawah per kaki lebar slab yang diperlukan adalah $A_S = M/(21.600 \times d) = 19.200/(21.500 \times 5) = 0{,}18$ in^2/ft lebar. Kebutuhan tulangan suhu dan susut adalah $A_S = 0{,}024(6) = 0{,}14$ in^2/ft lebar. Pembaca harus membuktikan bahwa tulangan lentur mungkin berupa tulangan no. 4 berjarak 12 in. searah bentang slab, dan kebutuhan tulangan suhu dan susut dipenuhi oleh tulangan no. 3 berjarak 9 in. dari as ke as pada arah melintang.

Balok anak pada Potongan AA dan BB, yang membentang pada arah melintang slab yang ditopangnya, paling baik didesain sebagai balok persegi menerus yang menopang lebar luasan daerah pembebanan lantai yang sama dengan jarak balok anak. Untuk menyediakan kekakuan yang cukup dan lendutan yang kecil, tebal keseluruhan balok anak dan balok utama sekurang-kurangnya harus $L/20$ untuk bentang menerus dan $L/16$ untuk bentang sederhana. Ketika balok anak ini diletakkan berdekatan, balok-balok ini akan mempunyai lebar yang kecil sampai 4 in., bergantung pada kebutuhan geser. Perhatikan bahwa jaringan dengan lebar 4 in. hanya memungkinkan sebuah tulangan sengkang vertikal pada penampang melintang balok. Suatu sistem dek dengan balok anak berjarak dekat ini sering dianggap sebagai slab berusuk.

Jika balok anak tersebut mempunyai bentang sederhana, maka tiap-tiap balok anak dapat dianalisis sebagai sebuah balok T seperti ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Potongan AA, dan untuk balok dengan bentang sederhana, lendutan yang berlebihan dapat dicegah jika ketebalan elemen setidaknya $L/16$. Penampang bentuk T mungkin dianalisis sebagai balok persegi dengan lebar yang sama dengan jarak balok usuk, tetapi semua tulangan lentur harus ditempatkan di dalam lebar balok usuk yang sempit tersebut. Slab berusuk pada dasarnya adalah sebuah slab tebal yang solid yang membentang searah balok usuk, tetapi slab ini memiliki kelebihan tarikan beton yang dipindahkan. Meskipun demikian, balok usuk yang sempit menyediakan luasan yang lebih terbatas untuk menempatkan semua tulangan lentur yang diperlukan dan juga menahan tegangan geser terpusat. Ketika balok usuk membentuk balok anak dengan bentang menerus, momen negatif pada ujung balok anak menentukan kebutuhan tulangan karena sayap (atas) penampang T menerima tarik dan tidak efektif. Dalam hal ini, analisis balok persegi menerus diperlukan.

Dengan ketebalan slab solid yang diperlukan sebesar $L/25$, bentang yang diperlukan untuk slab 25 ft adalah 12 in. dan ini merupakan batas atas slab yang dipakai untuk slab satu arah. Tetapi, jika kolom bangunan

diletakkan pada *grid* persegi terdekat, maka terbentuk slab dua arah. Jika lebar dan panjang panel slab diperkirakan sama, maka tulangan lentur dipasang pada kedua arah slab dan hasilnya, setengah besar beban ditahan pada masing-masing arah slab. Slab dua arah lebih kaku daripada slab satu arah, sehingga batas ketebalannya sekitar setengah ketebalan slab satu arah. Di samping itu, slab dua arah mempunyai kemampuan bentang yang lebih besar dibandingkan dengan slab satu arah pada ketebalan yang sama, sehingga slab dua arah lebih berguna ketika diperlukan jarak antar kolom yang lebih besar.

Slab dua arah dapat ditumpu oleh balok utama yang membentang sepanjang garis kolom, atau jenis slab dua arah yang lain adalah slab dua arah tanpa balok utama yang dikenal sebagai plat datar *(flat plates)* yang disambung langsung ke kolom. Pada slab jenis ini, beban tinggi yang dihasilkan dari luasan daerah pembebanan sistem plat slab yang relatif besar menyebabkan slab harus ditebalkan pada daerah sambungannya dengan kolom (daerah yang ditebalkan ini disebut panel gantung *(drop panel)*). Jika tidak, beban besar dari dek tipis yang ekspansif dapat menimbulkan geser pada kolom dengan cara yang sama seperti kolom yang terdorong oleh pondasi tapak yang terlalu tipis.

Latihan Desainlah slab menerus sepanjang 4 ft pada Potongan AA. Perhatikan bahwa selapis tulangan sudah memadai.

Tentukan tulangan lentur dan geser yang diperlukan untuk balok usuk slab menerus sepanjang 25 ft pada Potongan AA dan BB.

Misalkan balok pada Potongan BB mempunyai bentang sederhana. Desainlah balok usuk dengan menggunakan analisis balok T. Asumsikan bahwa jaringan (web) adalah 8 in, dan lebar efektif sayapnya adalah 12 kali ketebalan slab, atau $12 \times 6 = 72$ in.

12.5 Beban Gempa pada Portal Kaku

Seperti yang telah kita bicarakan, ketika terjadi keruntuhan tanah pada bidang masif lapisan keras bumi, pergerakan keras ke samping pada permukaan bumi mengakibatkan beban lateral yang sangat besar pada struktur, yang hampir sama dengan satu setengah kali berat vertikal struktur. Seperti dilukiskan pada Gambar 12.3, lantai masif bangunan menahan gaya dinamis sebesar massa lantai dikalikan kecepatannya masing-masing, yang tentunya semakin besar pula pada lantai yang lebih tinggi. Pada suatu portal penahan momen, elemen tersebut harus dapat menahan lentur yang dihasilkan beban ini.

Kasus yang diperlihatkan pada gambar adalah suatu kasus khusus di mana gempa berkekuatan sedang menyebabkan beban lateral sebesar 10% berat vertikal struktur. Kolom portal momen pada masing-masing lantainya menahan kegagalan geser lateral yang memaksa mereka mengalami tekukan rangkap, sampai ke balok utama bangunan tempat kolom tersebut tersambung secara kaku. Lukisan yang jelas dari perubahan bentuk portal kaku menunjukkan bagaimana balok utama dan kolom bekerja bersama menahan beban lateral melalui momen lentur yang berlawanan arah yang menyebabkan tekukan rangkap. Portal momen adalah suatu struktur tak tentu, dan kita dapat membuat dua asumsi yang membuat kita dapat menganalisis portal secara penuh.

Pertama-tama, kita asumsikan kolom lantai dasar menahan kegagalan geser horisontal yang sama. Untuk asumsi kedua, kita lihat diagram geser dan momen kolom bagian dalam, dan kita lihat bahwa elemen yang mengalami tekukan rangkap pasti mempunyai suatu titik nol momen pada pertengahannya, yang disebut titik balik lentur. Pada titik ini, seperti pada titik balik lentur semua balok utama dan kolom portal, kita mengasumsikan ada suatu sambungan sendi, karena tidak ada momen yang terjadi pada sambungan sendi tersebut. Analisis perkiraan yang kita lakukan didasarkan pada metode analisis portal, yang sebelum era komputer merupakan metode utama perancangan struktur bertingkat tinggi, dan metode ini masih digunakan secara luas sampai sekarang.

Karena kita paling memperhatikan kolom bagian dalam lantai dasar, yang merupakan elemen kritis jika terjadi gempa (seperti yang kita gambarkan pada susunan kolom yang dilukiskan pada gambar), kita dapat melakukan analisis yang terfokus pada satu kolom saja. Jika diafragma lantai dan atap cukup kaku, seperti pada struktur beton, kita boleh mengasumsikan semua kolom pada suatu lantai menahan beban lateral yang sama. Dengan beban mati sebesar 100 psf di atas tiga lantai bangunan pada Gambar 12.2, total berat vertikal yang terjadi adalah W = 100 psf $\times 3 \times (80 \times 75)$ ft^2 = 1.800.000 lb, beban lateral (baik untuk arah gempa utara-selatan maupun timur-barat) adalah $Q = W/10$ = 180.000 lb, dan untuk satu dari 16 kolom lantai dasar yang menerima beban yang sama, beban lateralnya adalah V = 180.000/16 = 11.250 lb. Tinggi kolom diukur sebagai jarak bersih antara lantai dan bagian bawah balok utama lantai di atasnya, atau L = 14 – 32/12 = 11,3 ft. Jadi, momen beban lateral adalah M = 11.250 × 11,3/2 = 64.000 ft –lb.

Latihan Berapakah momen beban angin pada kolom bagian dalam untuk arah angin timur-barat yang menghasilkan tekanan sebesar 25 psf ? ■

12.6 BALOK-KOLOM

Seperti yang telah kita bicarakan, elemen kolom vertikal portal beton kaku menahan momen lentur seperti beban aksial; karenanya, istilah balok-kolom menggambarkan secara lebih akurat jenis penahan beban yang disediakan oleh elemen ini. Tetapi, secara umum, elemen ini lebih praktis disebut kolom.

Kolom beton bertulang umumnya mempunyai penampang persegi dan bundar, meskipun bentuk penampang lainnya juga dapat digunakan. Kolom harus mempunyai setidaknya 4 tulangan longitudinal, yang mungkin saja menggunakan tulangan berdiameter besar seperti tulangan no. 18, dan sengkang lateral berdiameter kecil seperti tulangan no. 3 atau no. 4. Sengkang ini menjaga tulangan longitudinal dari kemungkinan tekuk karena tekan, dan menghasilkan inti kolom yang kuat pada saat terjadi kehilangan penutup beton pelindung tulangan setebal 1,5 in. yang diperlukan.

Istilah *kolom bersengkang* (*tied column*) mengacu pada kolom dengan penampang melintang persegi dan bundar dengan 4 buah tulangan longitudinal minimum, dan dengan sengkang yang membentuk lingkaran tertutup mengelilingi tulangan longitudinal setiap jarak 12 sampai 18 inci atau lebih sepanjang kolom, seperti sengkang balok. Jika sengkang berbentuk spiral mengelilingi sekitar 6 tulangan minimum dengan jarak spiral 3 – 4 in., elemen ini disebut *kolom spiral.* Meskipun elemen ini kalah populer dibandingkan dengan kolom sengkang akibat biaya fabrikasinya yang tinggi, kolom spiral sering digunakan pada daerah dengan tingkat kerawanan gempa yang tinggi karena kolom spiral mempunyai daktilitas yang besar dan ketahanan pada keadaan kelebihan tegangan, bahkan jika penutup beton telah mengelupas.

Persentase tulangan longitudinal kolom yang diijinkan berkisar antara 1% sampai 8% dari luas penampang melintangnya. Karena rasio modular adalah 8, setiap 1% tulangan menambah luasan penampang melintang kolom beton yang ekivalen sebesar 8%, dan lebih signifikan lagi, jika ada eksentrisitas beban yang harus diperhatikan, tulangan akan menahan tarik, sehingga membuat elemen beton berlaku sebagai balok-kolom. Karena itu, peraturan bangunan menyebutkan bahwa semua kolom beton didesain sebagai balok-kolom dengan eksentrisitas minimum, $e = 0{,}1 \times h$, di mana h adalah lebar kolom searah eksentritas.

Kita harus menganalisis balok-kolom beton bertulang sebagai elemen komposit, sehingga analisisnya tidak semudah analisis pada baja dan kayu. Seperti kasus sebelumnya ketika kita membuat kurva hubungan tegangan tekan yang diijinkan terhadap rasio kerampingan untuk penampang kayu dan baja, Anda mungkin ingin melewatkan saja paragraf berikut yang

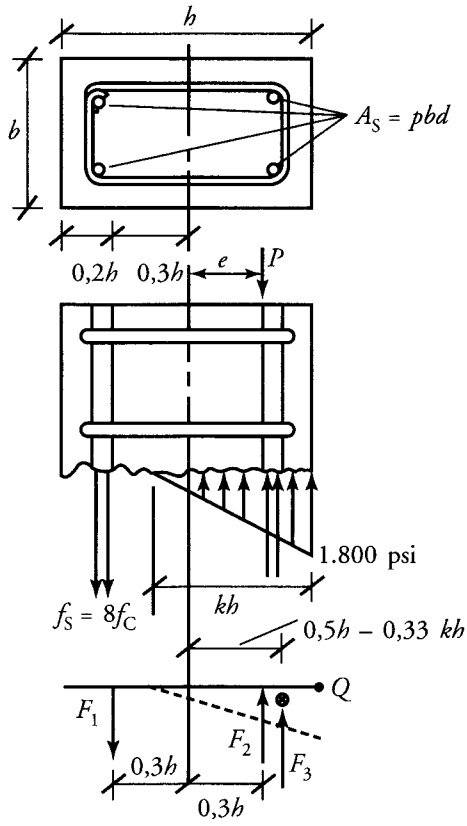
membicarakan tentang proses pembuatan kurva. Berdasarkan rumus pada Gambar 12.4, kita akan mengakhiri proses pembuatan sejumlah kurva balok-kolom untuk berbagai persentase tulangan longitudinal yang diperlihatkan pada Gambar 12.5, dan Anda boleh memilih untuk membicarakan topik sekitar hal tersebut atau tidak.

Pertama-tama kita menentukan gaya normal dan momen lentur yang diijinkan dari sebuah elemen yang pendek dan gemuk dengan menganalisis distribusi tegangan baja dan beton pada luasan penampang melintang, seperti diperlihatkan untuk kolom sengkang persegi pada Gambar 12.4. Kita membatasi diskusi kita pada elemen pendek dengan $L/n < 10$. Suatu momen lentur dengan gaya normal dapat dianggap sebagai beban eksentris ekivalen P, di mana besar momen adalah $M = P \times e$. Kolom mempunyai persentase tulangan baja, $p = A_S/bh$, dengan jumlah yang sama, $p/2$, pada muka penampang melintang yang terjauh dari sumbu lentur netralnya, seperti diperlihatkan. Dengan penutup beton sekurang-kurangnya 1,5 in, diameter sengkang no. 4, dan jari-jari tulangan baja longitudinal, letak pusat tulangan diperkirakan $0{,}2h$ jauhnya dari muka kolom terluar.

Karena kolom biasanya dihubungkan secara kaku dengan balok dan jarang sekali dapat lurus secara sempurna, balok-kolom beton harus didesain dengan eksentrisitas beban minimum, $e \geq 0{,}1h$. Distribusi yang umum dari kombinasi tegangan ini terjadi dengan beban eksentrisitas seperti diperlihatkan pada gambar di mana separuh tulangan mengalami tarik, dan separuhnya lagi mengalami tekan, dengan baji tegangan tekan yang bekerja pada bagian penampang melintang kolom, $b \times kh$. Tegangan lentur pada penampang melintang bertambah dengan semakin bertambahnya jarak dari sumbu netralnya. Dan juga, dari penyelidikan kita tentang elemen komposit, kita tahu bahwa tegangan pada suatu titik pada baja adalah $n = E_S/E_C = 8$ kali tegangan pada beton pada tempat yang sama.

Dari hasil observasi ini, kita menggunakan segitiga yang sama untuk mengembangkan hubungan tiga gaya internal, F_1, F_2, dan F_3, yang menahan beban eksentrisitas. Ketiga gaya ini dapat digambarkan hubungannya dengan tegangan lentur maksimum beton yang diijinkan, $f = 1.800$ psi, persentase baja P, luas penampang melintang bh, dan variasi ketinggian baji tekan kh. Tegangan tarik maksimum baja yang diijinkan adalah 24.000 psi akan menentukan gaya F_1 saja ketika persentase baja kurang dari 2% dan elemen bekerja lebih sebagai balok ketimbang sebagai kolom. Hal ini terjadi jika elemen menopang beban yang kecil P dengan momen eksentrisitas yang tinggi, $P \times e$.

Kita dapat membuat *spreadsheet* dengan menggunakan kisaran nilai k dari 1,2 sampai 0,3, untuk berbagai nilai persentase tulangan baja p. Untuk semua nilai k pada kisaran ini, kita menghitung beban aksial P,



$$F_3 = \frac{1.800}{2}\ khb$$

$$F_2 = \frac{pbh}{2}\ (8 \times 1.800) \times \left(\frac{k - 0{,}2}{k}\right)$$

$$F_2 = \left(\frac{-1.440}{k}p + 7.200p\right) bh$$

$$F_1 = \left(\frac{pbh}{2}\right)(8 \times 1.800)\left(\frac{0{,}8 - k}{k}\right)$$

$$F_1 = \left(\frac{5.760}{k}\ p - 7.200p\right) bh$$

$$P = F_2 + F_3 - F_1$$

$$P(h/2 - e) = F_2(0{,}2h) + F_3\left(\frac{kh}{3}\right) - F_1(0{,}8h) = M_Q$$

$$M = Pe = Ph/2 - M_Q$$

GAMBAR 12.4

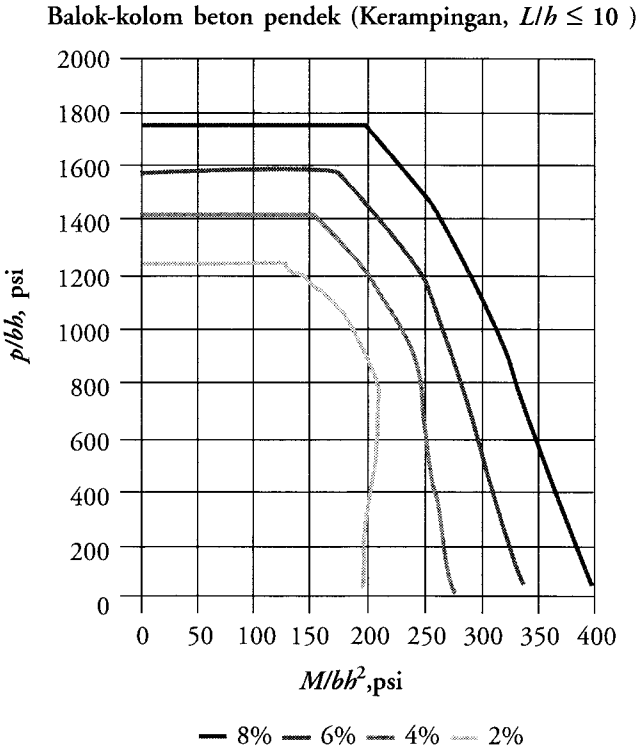
sebagai jumlah tiga gaya tersebut, dan dengan nilai momen pada sembarang titik Q, kita dapatkan $M = P \times e$, seperti diperlihatkan pada gambar. Perhatikan bahwa ketika $k > 0{,}8$, semua tulangan menerima tekan, dan ketika $k \geq 1$, keseluruhan penampang melintang menerima tekan.

Hasil *spreadsheet* semacam ini untuk persentase tulangan 2%, 4%, 6%, dan 8% diperlihatkan pada Gambar 12.5, di mana nilai P dibagi

dengan luas penampang kolom bh, dan momen eksentrisitas korespondensinya dibagi dengan bh^2. Selanjutnya, sumbu vertikal dan horisontal masing-masing menunjukkan tegangan aksial yang diijinkan, f_A, dan tegangan lentur yang diijinkan, f_B, untuk balok-kolom beton. Jadi, semua titik yang terletak di antara salah satu kurva dan titik awal (0,0) merupakan kisaran kombinasi tegangan aksial dan lentur yang diijinkan (f_B, f_A) yang dapat ditopang oleh sebuah elemen kolom dengan persentase tulangan baja tertentu. Dengan mengetahui koordinat sebuah titik pada diagram kurva tersebut, kita dapat melakukan interpolasi antara kurva-kurva untuk menentukan berapa persentase tulangan baja p yang diperlukan untuk kombinasi (f_B, f_A) yang diberikan.

Batas eksentrisitas minimum, $e = 0{,}1h$, yang harus dipenuhi, menyebabkan kurva menjadi rata pada bagian atasnya, sehingga kisaran kombinasi (f_B, f_A) menjadi pepat. Ketika menggunakan grafik untuk kolom beton yang ramping, terutama untuk kolom pada portal momen tanpa pengikat, momen yang terjadi harus dikalikan dengan faktor pembesar momen, $1/(1 - F/F_{CR})$. Seperti yang telah kita bicarakan, F_{CR} adalah beban tekuk suatu kolom lurus dengan beban pada sumbu kolom dan

GAMBAR 12.5



untuk kolom beton, beban ini dibagi dengan suatu faktor keamanan sebesar 2, atau $F_{CR} = 5EI/L^2$. (Di sini P dan F dapat digunakan secara bergantian).

Misalnya, untuk kasus kolom bagian dalam dengan tinggi bersih (netto) 11,3 ft dan penampang melintang 18 in. × 18 in. pada Gambar 12.2, $F_{CR} = (5 \times 3.500.000 \times 18^4/12)/(11{,}3 \times 12)^2 = 8.330.000$ lb. Elemen ini menerima beban aksial sebesar 268.000 lb, sehingga momen harus diperbesar dengan faktor sebesar $1/(1 - 268/8.330) = 1{,}03$. Kolom mempunyai momen akibat gaya berat sebesar 51.000 ft-lb, dan momen akibat gempa sebesar 64.000 ft-lb. Tegangan aksial yang terjadi adalah $P/bh = 268.000/(18)^2 = 830$ psi, dan tegangan lentur efektif adalah $M/bh^2 = (1{,}03)\ (51.000 + 64.000)(12)/(18^3) = 244$ psi. Titik (244,830) terletak pada kurva $p = 4\%$, sehingga kita memerlukan tulangan baja sebesar $A_S = 0{,}04\ (18)^2 = 13$ in^2, atau 10 tulangan baja no. 10 (lima tulangan untuk setiap muka kolom). Perhatikan bahwa faktor pembesar momen dapat diabaikan untuk kolom pendek yang kita bicarakan secara terbatas. Analisis kolom beton dengan kerampingan $L/h > 10$ sangat rumit, namun untungnya kebanyakan kolom hanya mempunyai $L/h < 10$.

Jika kita mengasumsikan adanya kemungkinan beban hidup penuh secara serentak dengan gempa berkekuatan besar, walaupun kecil, kita dapat membenarkan penggunaan penampang 18 in × 18 in di mana $A_S = 0{,}08 \times 18^2 = 26$ in^2, dengan jumlah 12 tulangan baja no. 14. Jika tidak, diperlukan penampang kolom yang lebih besar, atau kita harus mempertimbangkan pemakaian ikatan pada portal dengan menggunakan dinding elevator beton dan/atau penggunaan dinding geser.

Jika kita menggunakan kolom 20 × 20, $P/bh = 670$ psi, dan $M/bh^2 = 73$ psi. Dari diagram kita lihat koordinat titik (173, 670) terletak dekat dengan kurva $p = 2\%$. Kita lalu menyimpulkan bahwa luas tulangan baja longitudinal yang diperlukan adalah $A_S = 0{,}02\ (20^2) = 8$ in^2, atau 4 tulangan no. 9 pada masing-masing muka kolom. Jika bangunan tidak diikat terhadap arah gempa utara-selatan, maka dilakukan lagi analisis kolom yang hampir sama untuk menentukan berapa tulangan baja yang diperlukan pada dua arah kolom yang lain.

Sebelum kita meninggalkan topik balok-kolom, menarik untuk diingat apa yang terjadi bila $P = 0$, dan elemen hanya bekerja sebagai balok. Koordinat titik yang bersesuaian (f_B, 0) pada diagram interaksi balok-kolom menunjukkan tegangan yang diijinkan untuk penampang beton yang mempunyai penulangan pada kedua sisi tarik dan tekannya dari sumbu netral, dan balok seperti ini disebut penampang dengan penulangan rangkap. Ingat bahwa untuk balok seimbang dengan 1,4% tulangan baja yang dipasang hanya pada bagian tarik penampang melintangnya saja, tegangan efektif yang diijinkan adalah $M/bd^2 = 300$

Jika kita gunakan jumlah tulangan baja yang sama pada sisi tekan dan membuat elemen dengan tulangan rangkap dengan persentase tulangan 2(1,4) ≈ 3%, kita melakukan interpolasi antara kurva 2% dan 4% pada diagram untuk mendapatkan M/bh^2 = 230 psi. Karena $d = 0{,}8h$, M/bh^2 = 230 psi ekuivalen dengan M/bd^2 = 360 psi, yang lebih besar 20% daripada M/bd^2 = 300 psi untuk penampang dengan tulangan tunggal. Penambahan kapasitas momen elemen dengan tulangan rangkap ini jadi berguna ketika ukuran balok terbatas, tetapi balok itu harus menerima momen yang tinggi, seperti pada bagian ujung balok menerus pada slab berusuk.

Latihan Apakah kolom 18 in × 18 in sudah memadai untuk kolom bagian dalam lantai kedua pada Gambar 12.2? Jika ya, berapakah luas tulangan baja yang diperlukan?

Jika kita memasang ikatan pada portal, apakah kolom 18 in × 18 in tersebut memadai? Berapa ukuran minimum kolom persegi bagian luar yang diperlukan jika portal diikat? ■

12.7 Balok Utama Pascatarik dan Prategang

Asumsikan bahwa selain menggunakan belok beton bertulang yang normal dengan penampang melintang retaknya, kita dapat menggunakan elemen penampang melintang tanpa retak. Kita akan mendapatkan kapasitas momen yang lebih besar dari elemen yang sama seperti mempunyai balok yang jauh lebih kaku. Hasilnya, kita dapat menggunakan elemen tersebut pada jarak bentang yang lebih besar, dengan jaminan tegangan yang diijinkan tidak dilampaui dan lendutan yang terjadi kurang dari $L/300$.

Hal ini dapat dicapai dengan mengerjakan proses pascatarik dan prategang pada tendon baja mutu tinggi di daerah tarik balok. Dengan kedua metode tersebut, kita mencegah tegangan tarik pada penampang melintang beton dan penampang melintang penuh yang bekerja menopang beban. Tendon baja mutu tinggi yang khusus ini mempunyai diameter nominal $\frac{1}{2}$ in. dan tegangan yang diijinkan sebesar 150.000 psi (jenis tendon yang sama kita gunakan untuk mencegah retak pada plat lantai bangunan residensial)

Seperti yang sudah kita lihat sebelumnya pada plat di atas permukaan tanah, balok utama pascatarik melibatkan proses penempatan tendon baja yang dibungkus dengan suatu tabung pada bekisting balok dan kemudian meregangkan tendon tersebut dengan suatu gaya tarik setelah

penuangan beton selesai dan beton mengeras. Ujung bebas tendon diregangkan sementara ujung lainnya diangkur pada sebuah pelataran beton, menghasilkan gaya tarik yang kemudian ditransfer ke elemen beton dengan cara menjepit tendon tersebut dengan suatu alat, dan ketika tendon tersebut dilepaskan, tendon itu mengerjakan gaya yang diterima oleh ujung balok utama. Karena tendon yang diregangkan tersebut, yang sekarang diangkur pada kedua ujung balok utama, berusaha memendek kembali ke keadaan tanpa tegangan, gaya tariknya berubah menjadi tekan pada balok utama karena ujung tendon tersebut ditarik secara bersamaan.

Pada sistem prategang, tendon tanpa tabung ditempatkan pada bekisting balok dan diregangkan dengan tarikan sebelum campuran beton basah dituangkan dan mengeras. Setelah beton mengeras dan mengikat tendon yang ditegangkan tersebut, tendon dipotong pada kedua ujung balok utama. Karena tendon yang diregangkan itu berusaha kembali ke keadaan tanpa tegangan, gaya tariknya ditransfer ke balok utama sebagai tekan melalui ikatan antara baja dan beton. Proses penekanan balok utama pada pelataran prategang mencapai hasil yang sama dengan sistem pascatarik, dengan perbedaan bahwa proses transfer gaya tarik menjadi gaya tekan terjadi melalui ikatan sepanjang panjang balok utama untuk pratekan, dan bukan melalui pengangkuran ujung seperti pada sistem pascatarik.

Sistem pascatarik biasanya dilakukan bersamaan dengan penempatan elemen di lapangan. Balok utama prategang dibuat di pelataran pabrik dan kemudian baru diangkut ke lapangan. Biasanya beberapa balok utama dibariskan sehingga tendon menerus dapat diregangkan melalui semua balok utama tersebut sekaligus. Ketika beton sudah dituangkan dan mengeras, tendon menerus tersebut dipotong pada kedua ujung masing-masing balok utama, dan gaya tarik ditransfer ke balok utama sebagai gaya tekan.

Pada proses pentransferan ini, balok utama belum menerima beban penuhnya, dan setengah bagian bawah balok yang tertekan menyebabkan elemen ini sedikit melengkung ke atas. Lendutan ke atas ini disebut *camber*, yang harus diawasi pada balok utama jembatan agar dapat memberikan permukaan jalan yang rata. Perhatian harus diberikan untuk menghindari elemen membelah menjadi dua karena tarik yang berlebihan pada bagian atas elemen. Untuk alasan ini, dalam memproduksi beberapa balok utama secara massal tiap hari, sangat penting bagi perancang dan pembuat balok utama di pabrik untuk bekerja secara cermat demi menjamin kesetimbangan yang baik antara panjang elemen, jumlah tendon, kekuatan beton pada saat pentransferan, dan luas penampang melintang elemen.

Kita sudah melihat bahwa ketika sebuah balok dengan bentang sederhana yang dirancang dengan persentase tulangan baja yang seimbang (p = 1,4%), dibebani pada kapasitas penuh momennya, $M = 300bd^2$, lebih dari setengah bagian penampang mengalami retak dengan letak sumbu netral sejauh 0,375d dari bagian atas penampang. Untuk mencegah

lendutan yang berlebihan, kita biasanya menentukan suatu batas ketinggian, seperti $h > L/16$ untuk balok utama dengan bentang sederhana, sebagai pengganti perhitungan lendutan sebenarnya, $D = ML^2/10EI$, di mana momen inersia pada penampang retak I adalah sekitar setengah penampang penuh tanpa retak.

Pada Gambar 12.6, kita lihat penampang melintang efektif dan tegangan bahan yang dihasilkan pada balok beton bertulang biasa dengan penulangan seimbang berukuran 12 in. × 24 in. yang diberi tegangan penuh. Kita menyatakan bahwa tinggi bagian atas penampang melintang tanpa retak adalah $0{,}375d = 8$ in, atau hanya sepertiga penampang penuh. Untuk kasus balok dengan desain seimbang, momen yang diijinkan adalah

$$M = 300(12)(21{,}5)^2 = 1.660.000 \text{ in-lb} = 139.000 \text{ ft-lb}$$

Karena $M = wL^2/8$ untuk bentang sederhana, beban uniform yang diijinkan pada balok beton bertulang normal dengan desain seimbang di atas bentang sederhana sepanjang 24 ft adalah

$$w = 8M/L^2 = 8(139.000)/24^2 = 1.900 \text{ plf}$$

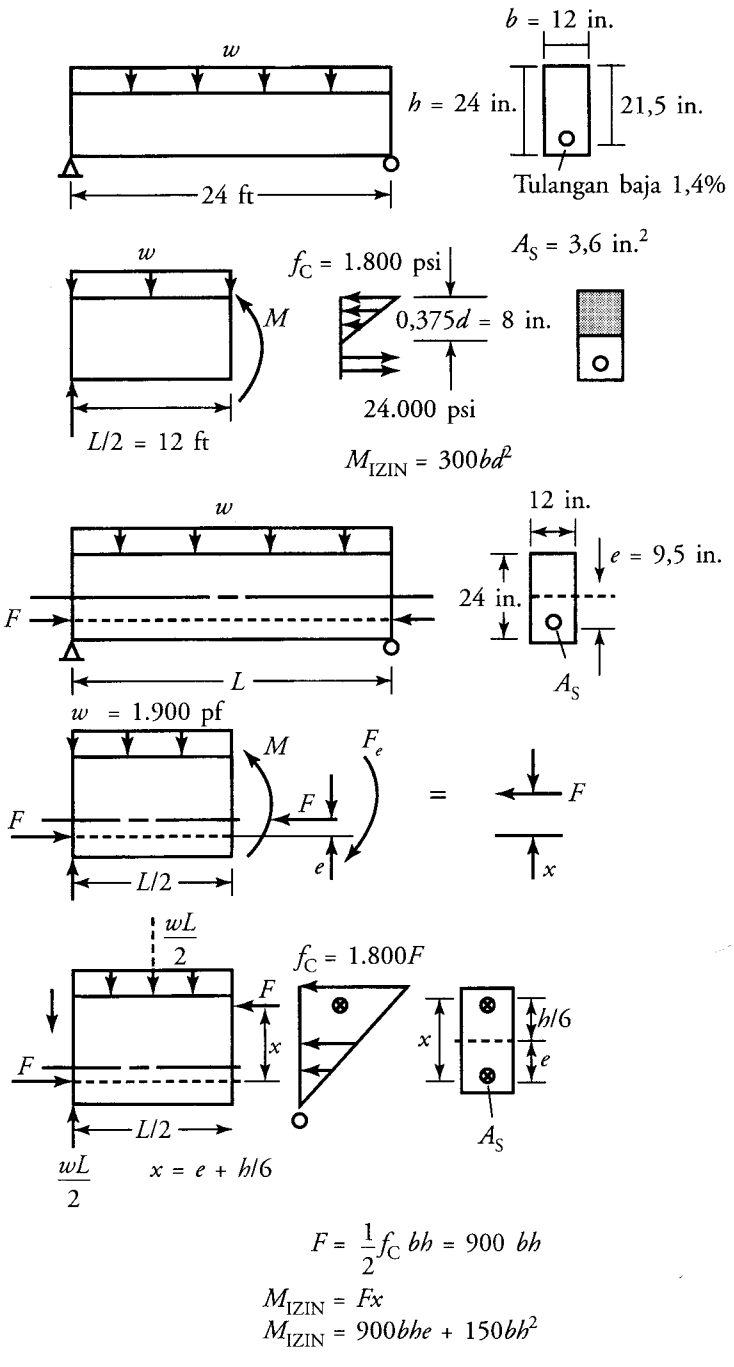
Jika kita asumsikan balok yang retak mempunyai setengah kekakuan balok yang tidak retak, lendutan yang terjadi adalah

$$D = \frac{1.660.000 \times (24 \times 12)^2}{10 \times \frac{1}{2}\left(3.500.000 \times \frac{12(24)^3}{12}\right)} = 0{,}6 \text{ in.}$$

Nilai ini sudah di bawah batas lendutan yang diijinkan $L/300 = 1$ in.

Kita lihat pada gambar luasan penampang melintang yang sama digunakan dengan tendon tegangan eksternal (baik prategang maupun pascatarik) terletak pada jarak $e = 9{,}5$ in. dari sumbu netral pada pusat penampang yang tidak retak. Untuk suatu penampang melintang dengan letak tendon yang diketahui e, luasan $A = bh$, dan modulus penampang, $S = bh^2/6$, ada suatu kombinasi unik dari momen yang bekerja M dan gaya tendon F yang akan menghasilkan distribusi tegangan tekan optimal pada penampang melintang yang tidak retak. Penampang seperti ini akan mempunyai baji tegangan tekan yang bekerja pada penampang dengan tegangan tarik nol pada bagian bawah, dan tegangan tekan penuh beton yang diijinkan pada bagian atas, $f_C = 1.800$ psi.

Pada penampang balok utama di pertengahan bentang, M ada momen yang bekerja M dan gaya yang bekerja pada tendon F. Efek dua gaya yang bekerja ini dapat dikurangi menjadi sebuah gaya tunggal F, yang dipindahkan dari garis kerjanya sepanjang tendon sejauh x sehingga menghasilkan efek momen yang sama, yaitu $M = F_X$. Kita temukan


w
24 ft
b = 12 in.
h = 24 in.
21,5 in.
Tulangan baja 1,4%
A_S = 3,6 in.²
f_C = 1.800 psi
0,375d = 8 in.
24.000 psi
M
L/2 = 12 ft
$M_{IZIN} = 300bd^2$
12 in.
e = 9,5 in.
24 in.
F
L
w = 1.900 pf
F_e
e
L/2
wL/2
f_C = 1.800F
x
h/6
$x = e + h/6$
$F = \frac{1}{2} f_C\, bh = 900\, bh$
$M_{IZIN} = Fx$
$M_{IZIN} = 900bhe + 150bh^2$

GAMBAR 12.6

bahwa baji tegangan tekan pada penampang yang tidak retak mempunyai titik berat pada jarak $h/6$ dari garis pusat penampangnya, di mana gaya F bekerja, sehingga kita dapatkan

$$x = e + h/6$$

Kesetimbangan gaya horisontal pada setengah bagian penampang balok mengindikasikan bahwa gaya pada tendon, F, harus sama dengan resultan gaya yang dihasilkan baji tegangan:

$$F = \frac{1}{2} f_C bh = 900bh$$

Akhirnya, kesetimbangan momen pada setengah penampang balok memberitahu kita bahwa momen yang bekerja pada balok, $wL^2/8$, adalah sama besar dan berlawanan arah dengan kopel penahan, Fx, sehingga momen ijin yang dapat dikerjakan pada balok utama pascatarik dan prategang adalah

$$M_{IZIN} = Fx = 900bhe + 150bh^2$$

Awalnya, kita ingin menentukan berapa luasan tendon baja, A_S, yang diperlukan untuk menjaga seluruh penampang melintang dalam keadaan tekan. Kemudian, dengan menggunakan beban merata yang sama, w = 1.900 plf, seperti pada balok beton bertulang biasa dengan bentang 24 ft, kita ingin melihat berapa panjang bentang tambahan yang mungkin dibuat oleh tendon dengan tegangan eksternal. Kita harus memeriksa lendutan bentang yang lebih panjang tersebut dengan menggunakan kekakuan elemen penuh tanpa retak EI.

Untuk menentukan luasan baja, kita harus mengetahui gaya yang diperlukan pada tendon, F, yang sama dengan hasil tegangan yang diijinkan dan luasan tendon, F = 150.000 (A_S) seperti baji gaya tekan, F = 900(12 × 24) = 259.000 lb, sehingga kita dapatkan

$$A_S = \frac{F}{150.000} = \frac{259.000}{150.000} = 1{,}73 \text{ in}^2$$

Luasan aktual dari suatu tendon tunggal bukanlah $\pi/4 \times (\frac{1}{2})^2 = 0{,}2$ in^2, karena tendon tidak bundar, namun terdiri dari seikat anyaman kawat baja kecil, dengan luas penampang melintang masing-masing kawat sesungguhnya sebesar 0,144 in^2. Jadi, kita memerlukan 1,73/0,144 = 12 kawat baja mutu tinggi. Kita dapat menggunakan dua lajur tendon yang masing-masing terdiri dari 6 kawat baja.

Untuk menentukan bentang yang diijinkan, pertama-tama kita menghitung kapasitas momen balok dengan tendon yang ditegangkan. Kita ingat bahwa $e = 9{,}5 = 0{,}4h$ dan $d = 21{,}5 = 0{,}9h$, sehingga

$$M_{IZIN} = 900bhe + 150bh^2 = 640bd^2$$

Kita lihat kapasitas momen ini lebih besar 110% dari balok beton bertulang biasa dengan desain seimbang, di mana $M_{IZIN} = 300bd^2$. Kapasitas momennya adalah

$$M_{IZIN} = 640(12 \times 21{,}5^2) = 3.550.000 \text{ in-lb} = 296.000 \text{ ft-lb}$$

Untuk beban merata atau terdistribusi, w = 1.900 plf, kita dapatkan bentang yang diijinkan

$$L = \sqrt{\frac{8M}{w}} = \sqrt{\frac{8(296.000)}{1.900}} = 3{,}5 \text{ ft}$$

Harga ini memperlihatkan kemampuan bentang meningkat 50% lebih dengan digunakannya tendon prategang atau pascatarikan pada balok beton.

Kita harus menjamin bahwa lendutan elemen yang lebih ramping ini tidak berlebihan. Lendutan balok prategang atau pascatarik didasarkan pada momen positif yang dihasilkan oleh beban terdistribusi, $D = ML^2/10EI$, dan lengkung ke atas akibat momen negatif konstan yang bekerja sepanjang balok utama, Fe = 259.000 × 9,5 = 2.460.000 in-lb, untuk $D = (Fe)\ L^2/8EI$, sehingga

$$D = \frac{(3.550.000/10 - 2.460.000/8)(35 \times 12)^2}{3.500.000 \times 12(24)^3/12} = 0{,}2 \text{ in.}$$

Tidak ada masalah menyangkut lendutan yang terjadi ini, karena lendutan yang diijinkan adalah $L/300$ = 1,4 in.

Latihan

Kerjakan lagi soal ini dengan mengasumsikan penampang ukuran 16 in × 60 in. di mana sentroid tendon baja berjarak 5 in. dari bagian bawah balok.

Berapa jarak sengkang yang diperlukan untuk balok beton bertulang biasa dan untuk balok prategang 12 × 24 yang disebutkan di atas?

Sebuah balok beton *I* dibuat dengan lebar kedua sayap 10 in. dan tebal 8 in, serta badan penghubungnya mempunyai tebal 4 in. dan tinggi 32 in. Luasan penampang melintang elemen ini sama dengan penampang 12 × 24 yang telah kita bicarakan di atas. Berapa bentang maksimum yang mungkin jika w = 1.900 plf dan tegangan pada bagian bawah adalah nol dan tegangan maksimum pada bagian atas adalah 1.800 psi? Pusat tendon terletak pada jarak 4 in. dari bagian bawah balok. ■

INDEKS

A

Adhesi (adhesion), 79
Analisis lentur untuk balok (flexural analysis of beam), 201-5

B

Bagian beban lintang (transversely loaded truss chord), 111-12
Bagian struktur (structural member):
Bagian struktur, balok (beams), 19, 20-23
Bagian struktur, beban lintang (transversely loaded), 19
Bagian struktur, busur (arches), 34-36
Bagian struktur, contoh balok lantai menganjur (overhanging deck beam exaple), 27-30
Bagian struktur, contoh balok utama kran atas-kepala (overhead crane girder example), 26-27
Bagian struktur, contoh jembatan gantung tali (rope suspension bridge example), 32-34
Bagian struktur, dua-gaya (two-force), 19
Bagian struktur, jenis (type of), 19
Bagian struktur, kabel (cables), 30-32
Bagian struktur, kolom (column), 36
Bagian struktur komposit (composite member), 72-73
Bagian struktur, sambungan (connections) 36-38
Bahan ulet, 65
Baja, tegangan izin untuk, (steel, allowable stress for), 161-162
Balok beton, bertulang, 104-5
Balok bubungan glulam (glulam ridge beams), 162, 169-71
Balok anak (joist)
Balok anak, kayu (wood), 163-66
Balok anak, table (tables), 166-67
Balok anak, web terbuka (open web), 284-89
Balok kayu, lenturan, geser, dan lendutan pada (timber beams, bending, shear, and deflection in), 100-1
Balok lantai (floor beams), 167-69
Balok lantai yang dikakukan (stiffened floor beams) 171-73
Balok lantai, dikakukan, 171-73

Balok menerus (continuous beams), 22
Balok menganjur (cantilever beams), 22
Balok menganjur, pendek (propped), 105-7
Balok sederhana (simple beam), 21
Balok tentu (determinate beam), 22
Balok:
Balok: analisis kaku (flexural analysis) 201-5
Balok: contoh balok lantai menganjur (overhanging deck beam example), 27-30
Balok: contoh balok utama kran menganjur (overhanging crane girder example), 26-27
Balok: jenis-jenis (type of), 19
Balok: jenis-jenis tumpuan (support types), 21
Balok: kekakuan (stiffness), 97
Balok: lendutan (deflection of), 101,5
Balok: menerus (continuous), 22
Balok: menganjur (cantilever), 22
Balok: peran (role of), 20-23
Balok: sederhana (simple), 21
Balok: tentu, 22
Balok-anak web terbuka (open web joists), 184-89
Balok-ikat kuda-kuda (collar beam), 164
Bantalan dukung (bearing pad), 37
Batang-tahan angin (wind bracing), 194-95
Batang-tahan-X, 197
Batas elastik (elastic limit), 64
Baut:
Baut: (konsenterasi tegangan dan), 85-87
Baut: untuk sambungan kayu (for timber connection), 174-76
Beban (loads):
Beban aksial (axial load), 19
Beban gravitasi merata, (distributed gravity loads), 13-15
Beban gravitasi, merata (gravity loads, distributed), 13-15
Beban hidup (live loads), 1
Beban hidup desain (design live loads), 40
Beban hidup tegak (vertical live loads), 40
Beban linear (linear loads), 39
Beban lintang (lateral load) 1, 40-43
Beban lintang terbagi-rata, 15-17
Beban mati (dead loads), 39-40
Beban struktur, dasar (structural load, basic), 1
Beban, daya jembatan rangka lantai (rating of a deck truss bridge), 52-55
Beban, desain (design), 39-43

Beban, diagram, 7
Beban, metode faktor (factor method), 161
Bentangan (span), 20
Beton, kekuatan (strength), 201
Beton, struktur (structure), 201
Beton, tegangan izin untuk (allowable stress for), 161-62
Beton, tiang pancang (pile), 149
Beton:
Bidang miring, gesekan pada (inclined slope, friction on), 8-10
Busur (arch) 34-36
Busur radial tiga-engsel (three-hinged radial arch), 58-59
Busur Tudor glulam Tudor arch), 177-80
Busur, busur radial tiga-engsel, 58- 58-59
Busur, glulam Tudor, 177-80

C

Cemuk bor (drilled shaft), 149-51
Contoh balok lantai menganjur (overhanging deck beam example), 27-30
Contoh balok utama kran atas-kepala (overhead crane grlder example), 26-27
Contoh jembatan gantung tali (rope suspension bridge example), 32-34
Contoh panil dinding-dinding (tilt-wall panel example), 10-12
Contoh tumpuan iklan (sign support exaple), 7-9

D

Deformasi (deformation), 63-67
Deformasi, temperatur, 70
Desain baja, kolom (column), 189-91
Desain baja (steel design):
Desain baja, balok-anak web terbuka dan lantai balok gilas (open web joist and rolled beam floor deck), 184-89
Desain baja, batang-kukuh angin (wind bracing), 194-95
Desain baja, jembatan balok utama pelat (plate girder bridges), 196-200
Desain baja, kolom-balok (beam-column), 191-95
Desain baja, profil struktur (structural shapes), 181-84
Desain beton, analisis lenturan balok, 201-5
Desain beton, beban gempa pada kerangka kaku (earthquake loads on rigid frames), 212-13
Desain beton, gelagar pasca-tarik dan pratekan (post-tensioning and prestressing girder), 217-21
Desain beton, kerangka menerus, 206-10
Desain beton, kolom-balok (beam-column), 213-17

Desain beton, penguatan geser (sher reinforcement), 205-6
Desain beton, sistem pelat dan lantai (slab and floor systems), 210-12
Desain beton:
Desain kayu (timber design):
Desain kayu, balok bubungan glulam (glulam ridge beams), 162, 169-71
Desain kayu, balok lantai, dikakukan (stiffened), 171-73
Desain kayu, balok, usuk, dan tap kayu (wood joists, rafters, and studs), 163-66
Desain kayu, baut dan paku (bolts and nails), 174-76
Desain kayu, busur Tudor glulam (glulam Tudor arch), 177-80
Desain kayu, flens balok-datar (joist tables), 166-67
Desain kayu, kolom (column), 173-74
Desain kayu, tegangan izin untuk (allowable stress for), 161-62
Desain kayu,balok lantai (floor beams) 167-69
Desain tapak-sebar jalur (strip footing design), 146-48
Diagram benda-bebas (free-body diagram), 7
Diagram geser dan momen (shear and momen diagrams), 24
Dinding (wall):
Dinding dukung-dalam (interior shear wall), 61-62
Dinding ruang bawah-tanah (basement walls) 157-59
Dinding, menganjur (cantilever), 17, 157
Dinding-dukung beban-datar, dalam (interior), 61-62
Dinding-tahan (retaining walls), 17-18. 155-57
Dinding-tahan gravitasi (gravity retaining walls), 155
Distribusi tegangan non uniform di bawah tapak (nonuniform stress distribution under footing), 112-1
Ditegang tak elastis (inelastically stressed), 65

E

Elastisitas, kayu penentu, 67-68
Elastisitas, modulus, 65
Engsel (hinges), 37, 55-57
Engsel, busur radial tiga-engsel (three-hinged radial arch) 58-59

F

Fondasi:
Fondasi, dangkal dan dalam (shallow and deep), 143
Fondasi, penurunan dan konsolidasi (settlement and consolidation), 136-39

G

Gaya baji (wedge force), 93-94, 220
Gaya keseimbangan (equilibrium), 1-4

Gaya konkuren (concurrent forces), 6
Gaya, definisi (defined), 1
Gaya, komponen (component), 5-7
Balok utama pelat baja, tegangan dan lendutan (steel girder, stress and deflection), 101-3
Balok utama pra-tegang, 217-21
Gempa (earthquake), 41-42
Gempa, beban pada kerangka kaku, 212-13
Gesekan kulit (skin frinction), 80-150
Gesekan pada bidang miring (friction on and inclined slope), 8-10
Grafik desain, kolom (design graphs, column), 122-23

H
Hokum gerak kedua Newton (Newton's second law of motion), 42
Hubungan baut dukung (bearing bold connection), 85
Hubungan volume-densitas (volume-density relationship), 129-31

J
Jembatan:
Jembatan Balok utama pelat (plate girder bridges, 196-200
Jembatan pilar pada tiang pancang, analisis (piers on piles, analysis of), 151 –53
Jembatan: daya beban rangka lantai (loading rating of a deck truss), 52-55
Jembatan: gelagar pelat, 196-200

K
Kabel (cable), 30-32
Kabel, contoh jembatan gantung tali (rope suspension bridge example), 32-24
Kayu lapis (laminated wood), 162
Kegagalan structural (structural failure), 161
Kekuatan tekanan tak terkekang (unconfined compressive strength), 136
Kerangka (frames), 55-58
Kerangka menerus (contiuous frame), 206-10
Kesetimbangan gaya-gaya dan momen (equilibrium of forces and moments), 1-4
Koefesien muai termal (coefficient of thermal expansion), 70
Kohesi (cohesion), 128
Kolom (column), 19, 36
Kolom spiral (spiral column), 214
Kolom terikat (tied column), 213-14
Kolom, baja (steel), 189-91
Kolom, grafik desain, 122-123
Kolom, kayu, 173-74
Kolom, kolom beban eksentrik dan kurva kolom (eccentrically loaded columns and column

curves), 188-22
Kolom, kolom tekuk membesar untuk kolom berongga (increasing buckling load of hollow), 116-18
Kolom, tekukan langsung lurus, 114-16
Kolom-balok (beam colomn), 19
Kolom-balok (beam colomn), baja dan (steel and), 191-93
Kolom-balok (beam colomn), beton dan (concrete and) 213-17
Kolom-balok (beam colomn), persamaan interaksi (interaction equation), 123-24, 179, 191-93
Konsolidasi (consolidation), 137-39, 243
Konstruksi pra-cetak (precast construction), 201
Kerangka kaku (rigid frames), 57, 206
Kerangka momen (momen frames), 47, 206
Kerangka momen, beban gempa pada, 212-13
Kerangka, beban gempa pada kerangka kaku (earthquake loads on rigid), 212-13
Kurva regangan-tegangan (stress-strain curve), 64
Kurva tekuk Euler (Euler buckling curve), 121

L

Lantai balok gilas (rolled beam floor deck), 184-89
Lasan (welds), 87-88
Lawan-lendut (camber), 218
Lendutan, 91
Lendutan, balok, 95-100
Lendutan, menentukan (sag, determining), 31
Lendutan, pada balok kayu (in timber beams), 100-1
Lendutan, pada balok utama pelat baja (in steel plate girder), 101-3
Lendutan-pampat konsolidasi dan fondasi (consolidation dan foundation), 136-39
Lendutan-pampat, diferensial (differential), 139-41
Lingkup geser dan momen (shear and moment envelopes), 208
Lintasan beban, daerah pembebanan dan (tributary areas and), 43-44
Lintasan beban, pada gedung bertingkat (in a multistory building), 45-46
Luas daerah pembebanan (tributary area), 14
Luas daerah pembebanan, lintasan beban dan (load paths and), 43-44
Lubang-galian sumbang (borrow pit), 129
Lumpur bor, 149

M

Mesin-gilas (roller), 21
Metode penampang (method of sections), 23-26
Metode tegangan kerja (working stress method), 161

Modulis elastisitas, kayu penentu, 67-68
Modulus elastisitas (modulus of elasticity), 65
Modulus elastisitas kayu, menentukan (timber modulus of elasticity, determining), 67-68
Momen (moment):
Momen, definisi (defined), 3
Momen, keseimbangan (equilibrium equation), 3
Momen, kopel (couple), 22
Momen, lengan (arm), 3

P

Pasca-tarik:
Paku, untuk sambungan kayu (nails, for timber connections), 174-76
Pasca-tarik, balok utama (girder), 217-21
Pasca-tarik, pelat lantai (floor slab), 69-70
Pelat lantai:
Pelat lantai, beton, 210-12
Pelat lantai, pasca-tarik (post-tensioned) 69-70
Pemadatan (compaction) 131-33
Pemadatan, tapak permukiman (residential site), 133-34
Pembebanan elastik (elastic loading), 64
Pemisahan muka-akhir, stabilitas (grade separation, stability of), 153-57
Pengaku/penopang-kokoh (ftiffener/strongback), 165
Penulangan baja (steel yield stress), 65, 162
Penulangan geser (shear reinforcement), 205-6
Perbedaan penurunan (differensial settlement), 139-41
Percepatan (acceleration), 16
Perletakan-anjur, tegangan dukung dan geseran pada (corbel, bearing stress and shear on a), 80-82
Persamaan kesetimbangan gaya mendatar (horizontal force equilibrium equation), 6
Persamaan kesetimbangan gaya tegak (vertical force equilibrium equation), 6
Pilar kayu (timber piles), 149
Pipa Shelby (Shelby tube), 127
Pusat gravitasi (center of gravity), 2
Pusat gravitasi, truk pada jembatan (a truck a bridge), 12-13

R

Rakit kayu (rafters, wood), 163-66
Rangka (truss), 47-50
Rangka, balok-datar rangka beban lintang (transversely loaded truss chord), 111-12
Rangka, contoh rangka atap (roof truss example), 50-52
Rangka, daya beban jembatan rangka lantai (load rating of a deck truss bridge), 52-55

Rasio keeksentrikan (eccentricity ratio), 120
Rasio modular (modular ratio), 117
Reaksi dalam dengan metode penampang (internal reaction by methode of sections) 23-26
Redundansi (redundancy), 47
Regangan (strain) 63-67

S

Sambungan (connection), 36-38
Sambungan (joint), 49
Sambungan baut jenis gesekan (friction-type bolted connections), 85
Sambungan engsel (pin connection), 37, 48, 55
Sambungan kaku (rigid connection), 38
Sambungan kritis-slip (slip-critical connection), 85
Sambungan rol (rol connection), 37
Sambungan sederhana (simple connection), 37
Sambungan tetap (fixed conection), 38
Sambungan, baut dan las (bolted and welded), 88-89
Sistem struktur (structural systems), 46-47
Sistem struktur tuned (tuned structural system), 43
Stabilitas landai (slope stability), 153-57
Struktur diafragma (diaphragm structures), 46, 60-61, 197
Struktur tanah (soil structure):
Struktur tanah, analisis pilar jembatan pada tiang panjang (analysis of bridge piers on piles), 151-53
Struktur tanah, desain tapak jalur (strip footing design), 146-48
Struktur tanah, dinding ruang bawah-tanah (basement walls), 157-59
Struktur tanah, fondasi dangkal dan fondasi dalam (shallow and deep fundation), 143
Struktur tanah, tapak sebar (spread footing), 143-46
Struktur tanah, tiang pancang dan cemuk bor (piles and drilled shaft), 149-51
Sudur lereng alam (angle of repose), 128
Sudut gesek material (material friction angle), 128

T

Tanah (soil):
Tanah, eksplorasi dan pengambilan contoh (exploration and sampling), 126-127
Tanah, formasi (formation), 125-126
Tanah, hubungan volume-densitas (volume-density relationship), 129-31
Tanah, kekuatan (strength), 134-36
Tanah, klasifikasi (classification), 127-28
Tanah, lendutan-pampat dan konsolidasi fondasi (fundation settlement and consolidation), 136-39

Tanah, lendutan-pampat diferensial (differential settlement), 139-41
Tanah, pemadatan, tapak permukiman (residential site), 133-34
Tanah, pemadatan (compaction), 131-34
Tanah, tinjauan (overview), 125
Tangka atap (roof truss), 50-52
Tap, kayu stud, wood, 163-66
Tapak-sebar (pread footing), 143-46
Tegangan (stress) 63-67 (Lihat juga tegangan geser)
Tegangan aksial dan lentur, gabungan (axial and bending stress, combined), 109-11
Tegangan dan deformasi temperatur (temperature stress and deformation), 70
Tegangan dukung (bearing stress), 76-77
Tegangan dukung (bearing stress), dan geseran pada perletakan-anjur (dan shear on a corbel), 80-82
Tegangan geser (shear stress):
Tegangan geser lentur (flexural shear stress), 93-95
Tegangan geser sederhana (simple shear stress), 79-80
Tegangan geser torsi (torsional shear stress), 84-85
Tegangan geser, baut dan konsentrasi tegangan (bolt and stress concentration), 85-87
Tegangan geser, geseran jeblos melalui tapak (punching stress through fooring), 82-84
Tegangan geser, kaku, 93,95
Tegangan geser, las (welds), 87-88
Tegangan geser, pada balok kayu (in timber beams), 100-1
Tegangan geser, sambungan baut dan las (bolted and walded connections), 88-89
Tegangan geser, tegangan dukung dan geser pada perletakan-anjur (bearing stress and shear on a corbel), 80-82
Tegangan geser, torsi (torsional), 84-85
Tegangan lengkung (warping stress), 85
Tegangan lentur (bending stress), 91-93
Tegangan lentur (flexural stress), 91
Tegangan lentur, pada balok kayu (in timber beam), 100-1
Tegangan, dukung (bearing), 76-77
Tegangan, gabungan (combined):
Tegangan, gabungan, aksial dan lentur (axial and bending) 109-11
Tegangan, gabungan, balok-datar rangka beban lintang (transversely loaded truss chord), 111-12
Tegangan, kaku (flexural), 91
Tegangan, lengkung (warping), 85
Tegangan, lentur (bending), 91-93
Tegangan, pada balok utama pelat baja (in steel plate girder), 101-3
Tegangan, tegangan aksial non uniform dan sentroid (nonuniform axial stress and centroids), 73-76

Tegangan, temperatur, 70
Tekanan kontak (contact pressure), 76-77
Tekukan panas (heat buckling), 71
Tekukan:
Tekukan: kolom langsing, lurus (of slender, straight columns), 114-16
Tekukan: pada beban tekuk yang naik pada kolom berongga (increasing buskling load or hollow column), 166-18
Telapak, desain fondasi jalur (design of strip), 146-48
Telapak, perataan tegangan non uniform di bawah, 112-13
Telapak, geseran jeblos melalui (punching shear through), 82-84
Telapak, sebar (spread), 143-46
Telapak:
Tiang pancang (piles), 149-51
Tiang pancang bor (augured pole), 149
Tiang pancang, analisis pilar jembatan pada (analysis of bridge piers on), 151-53
Titik berat (centroids), 73-76
Tulangan (rebars), 201-2
Tumpaun engsel (pin support), 21

U

Uji batas plastik (plastic limit test), 128
Uji batas cair (liquid limit test), 128
Uji Peneterasi Standar (Standard Penetration Test-SPT), 127, 136
Uji Proctor:
Uji Proctor Standar (Standard Proctor Test), 132-33
Uji Proctor, Modifikasian (Modified), 133
Ujung tetap (fixed end), 21
Urugan (fill), 129

MILIK
PERPUSTAKAAN
Jawa Timur